

Радиотелескоп РТ-1.8 для наблюдений за солнечной активностью

© М. Б. Зотов¹, В. Ю. Быков¹, Ю. В. Векшин¹, Д. В. Ерофеев¹, А. С. Лавров¹, В. Г. Стэмповский¹,
Е. Ю. Хвостов¹, В. К. Чернов¹, А. М. Шишикин¹, Д. С. Бетеня²

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
²СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Наблюдения за солнечной активностью не теряют своей актуальности, что требует разработки и создания новой аппаратуры. В ИПА РАН ведется разработка нового радиотелескопа на базе антенны диаметром 1.8 м для измерений интенсивности солнечного излучения в радиодиапазоне на длине волны 10.7 см. Основное назначение РТ-1.8 — определение степени поляризации солнечного излучения и параметров радиовсплесков, которыми пополняются ряды и базы данных о солнечной активности.

В работе представлены основные результаты разработки нового радиотелескопа: антенной системы, системы наведения, приемной системы, системы регистрации. Антенная система — зеркало в форме осесимметричного параболоида диаметром 1.8 м с фокусным расстоянием 660 мм. Система наведения обеспечивает точность сопровождения 5 угл. мин и высокие скорости поворота (до 5°/с), позволяющие не только сопровождать Солнце, но и выполнять быстрое сканирование и перебросы в целях калибровки. Фокальный контейнер приемной системы с облучателем располагается в первичном фокусе. Облучатель РТ-1.8 представляет собой скалярный рупор, работающий в полосе частот 2785–2815 МГц, угол облучения рефлектора $\pm(65-70)^\circ$. Приемная система позволяет принимать правую и левую круговые поляризации радиоизлучения с возможностью изменения типа принимаемой поляризации с помощью переключателя. Калибровка приемного канала осуществляется с помощью сигнала от генератора шума на лавинно-пролетном диоде. Для обеспечения стабильности калибровочного сигнала генератор шума термостатируется. Система регистрации выполнена на программно-определяемом радиоустройстве фирмы National Instruments USRP-2922 и располагается в подзеркальном пространстве радиотелескопа. Система регистрации позволяет оцифровывать полосу частот шириной 25 МГц с разрешением 16 бит. Управление и передача данных осуществляются по интерфейсу Ethernet. В работе приведены результаты измерения параметров приемной системы и облучателя, а также характеристики радиотелескопа, измеренные в обсерватории «Светлое».

Ключевые слова: Солнце, радиотелескоп, степень поляризации, приемная система, программно-определяемое радиоустройство.

Контакты для связи: Зотов Максим Борисович (zmb@iaaras.ru).

Для цитирования: Зотов М. Б., Быков В. Ю., Векшин Ю. В., Ерофеев Д. В., Лавров А. С., Стэмповский В. Г., Хвостов Е. Ю., Чернов В. К., Шишикин А. М., Бетеня Д. С. Радиотелескоп РТ-1.8 для наблюдений за солнечной активностью // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 61. С. 38–43.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.61.38-43>

RT-1.8 Radio Telescope for Solar Activity Observations

M. B. Zotov¹, V. Yu. Bikov¹, Yu. V. Vekshin¹, D. V. Erofeev¹, A. S. Lavrov¹, V. G. Stempkovsky¹,
E. Yu. Khvostov¹, V. K. Chernov¹, A. M. Shishikin¹, D. S. Betenya²

¹Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”

Abstract

Solar activity observations remain a relevant task for modern radio astronomy. Thus, the development of new radio telescopes is required. A new 1.8 m radio telescope for solar activity observations at 10.7 cm wavelength is being developed at IAA RAS. The main goal for this radio telescope is measuring solar radiation polarization and radio bursts parameters.

The work shows the results of the new radio telescope development, particularly the antenna system, pointing system, radio receiver and digital acquisition system. The antenna system is an axisymmetric parabolic mirror with the diameter of 1.8 m and the focal length of 660 mm. The pointing system provides a tracking accuracy of 5 arcmin and high slew rates (up to 5°/s), allowing not only tracking the Sun, but also performing quick scans and moves for calibration purposes. The focal container of the receiving system with the feed is located in the primary focus. The RT-1.8 feed is a scalar horn operating at 2785–2815 MHz frequency band, the reflector irradiation angle is $\pm(65-70)^\circ$. The receiving system allows receiving the right and left circular polarizations of radio emission with the ability to change the received polarization using a switch. This ensures the identity of the signal paths of the left and right circular polarization to determine

the polarization degree of solar radio emission. The receiving channel is calibrated with a signal from an IMPATT diode noise generator (IMPact ionization Avalanche Transit-Time diode). The noise generator is thermostated to provide the stability of the calibration signal. The digital acquisition system is based on the NI USRP-2922 software-defined radio device. It is located behind the mirror of the radio telescope. USRP allows digitizing the 25 MHz bandwidth with a 16 bit resolution. Control and data transmission are implemented via Ethernet interface. The paper presents the results of measuring parameters of the receiving system and feed, as well as the characteristics of the radio telescope measured at the Svetloe observatory.

Keywords: Sun, solar radio telescope, solar activity, receiving system, software-defined radio device, SDR

Contacts: Maksim B. Zotov (zmb@iaaras.ru).

For citation: Zotov M. B., Bikov V. Yu., Vekshin Yu. V., Erofeev D. V., Lavrov A. S., Stempkovsky V. G., Khvostov E. Yu., Chernov V. K., Shishikin A. M., Betenya D. S. RT-1.8 radio telescope for solar activity observations // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 61. P. 38–43.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.61.38-43>

Введение

Наблюдения за солнечной активностью требуют разработки и создания новой аппаратуры. В ИПА РАН ведется разработка нового радиотелескопа на базе антенны диаметром 1.8 м для измерений интенсивности солнечного излучения в радиодиапазоне на длине волны 10.7 см для замены существующего радиотелескопа Уссурийской астрофизической обсерватории (Кузьменко, 2008), аппаратура которого была произведена более 30 лет назад и к настоящему времени устарела.

Основное назначение РТ-1.8 — определение степени поляризации солнечного излучения (Tapping, 2013) и параметров радиовсплесков, которыми пополняются ряды и базы данных о солнечной активности (Benz, 2005). В статье представлены основные результаты разработки нового радиотелескопа: антенной системы, системы наведения, приемной системы и системы регистрации сигналов.

Антенная система и система наведения радиотелескопа

Антенная система (АС) РТ-1.8 представляет собой зеркало в форме осесимметричного параболаида диаметром 1.8 м с приемником в первичном фокусе. Фокусное расстояние составляет 660 мм (рис. 1). Зеркало установлено на экваториальном опорно-поворотном устройстве и приводится в движение шаговыми двигателями. Основные параметры антенной системы представлены в табл. 1.

Экваториальное опорно-поворотное устройство представляет собой переработанный вариант монтажа антенны Сибирского солнечного радиотелескопа. Изначально рассчитанное на установку на широте 52° опорно-поворотное устройство снабжено регулируемыми опорами, позволяющими использовать его в диапазоне широт места установки от 42° до 62° (Лесовой, 2008). Электропривод антенны полностью переработан и оснащён датчиками положения. Блок-схема системы наведе-

ния РТ-1.8 представлена на рис. 2 и включает: датчики углового положения 5БВТ-Д, редукторы EW090 (планетарный, 50:1), шаговые двигатели FL86STH, драйверы шаговых двигателей SMD9, контроллеры драйвера шаговых двигателей и компьютер оператора РТ-1.8.

Сопровождение источника радиоизлучения осуществляется от компьютера оператора по командам, поступающим на контроллер драйвера шаговых двигателей, на который также поступает сигнал обратной связи по положению от датчиков 5БВТ-Д. Разрешение датчиков положения составляет 20 угл. сек (16 разрядов), а точность сопровождения — 5 угл. мин. Высокие скорости поворота (до 5°/с) позволяют не только сопровождать Солнце, но и выполнять быстрое сканирование и перебросы по угловым координатам в целях калибровки.



Рис. 1. Радиотелескоп РТ-1.8 с приемной системой

Основные характеристики антенной системы РТ-1.8

Параметр	Значение
Диаметр рефлектора, м	1.8
Монтировка	экваториальная
Ширина ДН по уровню половинной мощности, °	4
Максимальная скорость, %с	
Прямое восхождение	4
Склонение	5
Максимальное ускорение, %с ²	
Прямое восхождение	20
Склонение	20
Ошибка системы наведения, приведённая к оси датчика положения, не более, °	0.12
Диапазон рабочих температур, °С	Минус 40 ...+40
Напряжение питания, В	230/50Гц
Потребляемая мощность, не более, Вт	500
Масса, кг	450

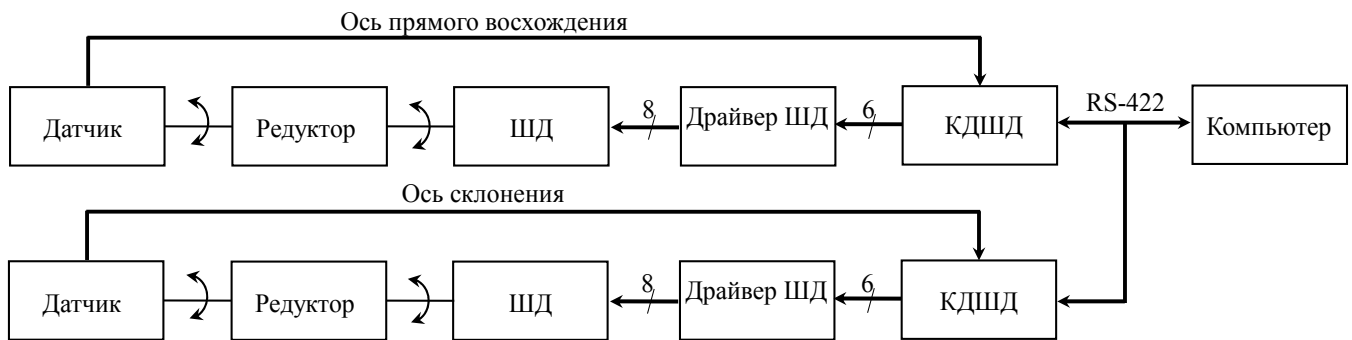


Рис. 2. Блок-схема системы наведения РТ-1.8

Программное обеспечение системы наведения РТ-1.8, установленное на компьютере оператора, состоит из двух модулей:

- драйвер РТ-1.8 обеспечивает асинхронный доступ к аппаратуре наведения РТ-1.8;
- панель оператора наведения, который:
 - реализует интерфейс пользователя для взаимодействия с системой наведения РТ-1.8;
 - обеспечивает ручное и автоматическое задание координат для системы наведения РТ-1.8;
 - обеспечивает автоматизацию наблюдений (сопровождение Солнца).

Взаимодействие между модулями осуществляется по протоколу TCP/IP. Программное обеспечение поддерживает работу в ОС Linux (ядро 4+) и Windows 7+.

Приемная система и система регистрации радиотелескопа

Приемная система (ПС) обеспечивает прием, усиление и выделение рабочей полосы частот солнечного радиоизлучения. Аппаратура приемной

системы предусматривает функции дистанционного управления, контроля параметров работы и диагностики неисправностей. Облучатель и приемная система размещаются в герметичном фокальном контейнере радиотелескопа (рис. 3).

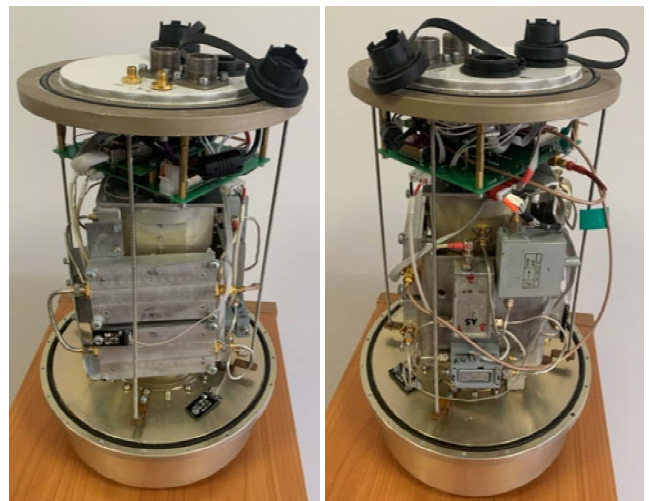


Рис. 3. Фокальный контейнер РТ-1.8 (без корпуса)

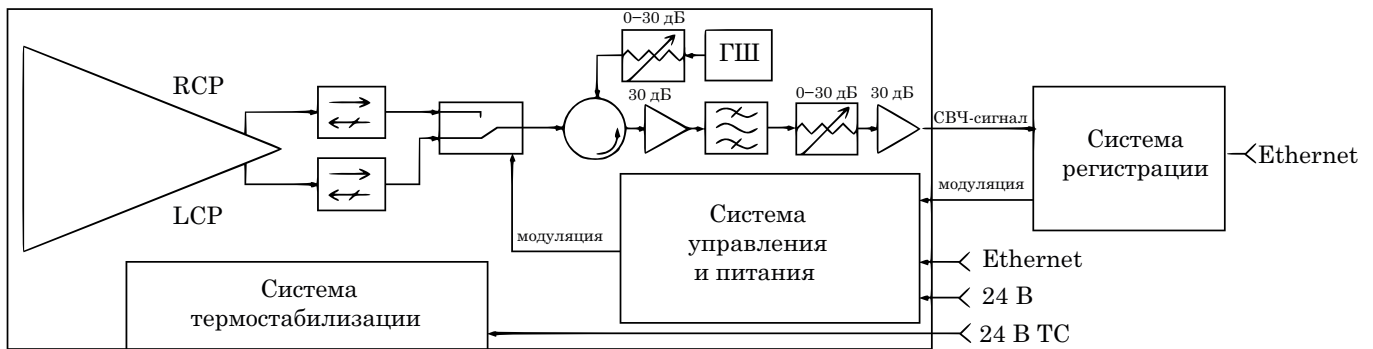


Рис. 4. Функциональная схема приемной системы РТ-1.8

Облучатель РТ-1.8 представляет собой скалярный рупор, работающий в полосе частот 2785–2815 МГц. Облучатель предназначен для антенн с отношением F/D в пределах 0.36–0.40, имеющих угол облучения рефлектора $\pm(65\text{--}70)^\circ$. Облучатель работает на правой и левой круговых поляризациях. Габариты облучателя: диаметр — 199 мм, длина — 248 мм. Уровень диаграммы направленности (ДН) облучателя в направлении кромок рефлектора антенны составляет около -15 дБ, что является оптимальным для радиоастрономических антенн. Уровень боковых лепестков и кросс-поляризационной ДН не превышает -22 дБ. Уровень эллиптичности круговой поляризации в направлении оси облучателя не более 0.4 дБ в рабочей полосе частот. Развязка между портами правой и левой поляризации в рабочей полосе частот не хуже 20 дБ. Коэффициент стоячей волны по напряжению выходных портов в рабочей полосе частот не превышает 1.2.

Основной режим работы приемной системы — модуляционный с возможностью смены принимаемой поляризации с помощью переключателя, что позволяет определять степень поляризации солнечного радиоизлучения. Функциональная схема приемной системы представлена на рис. 4. На выходах облучателя установлены согласующие СВЧ-вентили. На вход маломощного усилителя фирмы «Микран» поочередно поступают сигналы правой и левой круговых поляризаций (RCP и LCP), суммарный сигнал RCP+LCP- и калибровочный сигнал от генератора шума (при закрытии переключателя). Это позволяет «устранить» флуктуации коэффициента усиления приемного канала и провести калибровку приемника. Приемная система (ПС) может также работать в режиме полной мощности для одного из каналов. Для формирования полосы сигнала 2785–2815 МГц используются фильтры нижних и верхних частот разработки ИПА РАН. Для осуществления корректировки уровня выходной мощности и обеспечения линейности приемного тракта предусмотрен управляе-

мый аттенюатор с диапазоном регулировки 0–30 дБ. Для обеспечения стабильности калибровочного сигнала генератор шума термостатируется. Питание ПС, системы регистрации и термостата обеспечивается независимыми источниками питания, располагаемыми вне фокального контейнера.

Система управления ПС состоит из главной платы управления и электропитания, а также Ethernet-модуля. Плата управления предназначена для электропитания узлов ПС, распределения сигналов модуляции, а также для дистанционного управления всеми функциями узлов аппаратуры ПС и мониторинга основных параметров работы узлов ПС с целью удаленной диагностики неисправностей. Основное управление осуществляется по интерфейсу Ethernet 10/100 от компьютера, на который установлено специализированное ПО.

Измеренный коэффициент усиления ПС составляет 52 дБ при нулевом ослаблении управляемого аттенюатора, неравномерность амплитудно-частотной характеристики не превышает 0.1 дБ в рабочей полосе частот. Шумовая температура ПС не превышает 430 К.

В качестве системы регистрации для солнечного радиотелескопа РТ 1.8 применено устройство фирмы National Instruments USRP-2922. Оно содержит квадратурный демодулятор с перестраиваемым гетеродином и два аналого-цифровых преобразователя 100 MS/s, что позволяет оцифровывать I/Q компоненты сигнала с полосой 25 МГц и разрешением 16 бит в режиме реального времени. Данные передаются по интерфейсу 1 Gb Ethernet на компьютер, где обрабатываются, визуализируются и записываются в файл с помощью разработанной в среде LabVIEW программы. Мощность принятого сигнала измеряется при времени усреднения 0.1 с. Для устранения влияния гетеродина USRP-2922 на ПС система регистрации размещается в экранированном корпусе в подзеркальном пространстве радиотелескопа (рис. 5).

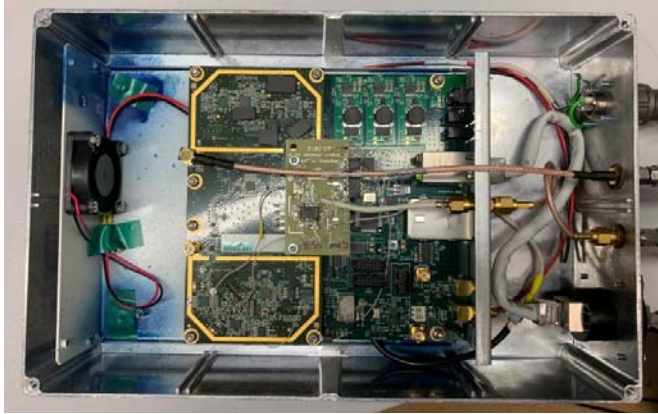


Рис. 5. Система регистрации РТ-1.8 в экранированном корпусе (без крышки)

Таблица 2
Основные характеристики приемной системы и системы регистрации

Параметр	Значение
Полоса принимаемых частот, МГц	2785–2815
Коэффициент усиления, дБ	61
Шумовая температура ПС, К	430
Чувствительность, К	0.8
Масса фокального контейнера	7.5 кг
Потребляемая мощность, не более Вт	100

Для измерения потока солнечного радиоизлучения система, как известно, должна быть линейной в широком динамическом диапазоне. Измеренный динамический диапазон разработанной приемной системы вместе с системой регистрации составил 65 дБ. Чувствительность системы в модуляционном режиме при шумовой температуре приемной системы 430 К и времени усреднения 0.1 с находится на уровне 0.8 К. Основные характеристики приемной системы и системы регистрации перечислены в табл. 2.

Результаты измерений характеристик радиотелескопа

Для проверки работоспособности радиотелескоп РТ-1.8 был установлен в обсерватории «Светлое» РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» и были измерены его основные характеристики. Шумовая температура приемной системы $T_{пр}$ и сигнал генератора шума калибровки измерялись методом двух отсчетов с помощью охлаждаемой жидким азотом согласованной нагрузки. Шумовая температура системы $T_{сист}$ определялась по калибровочному сигналу. Эквивалентная плотность потока радиотелескопа (SEFD) измерялась по данным потока Солнца на время измерений ([Space Weather services, Space Weather Canada](#)). Коэффициент использования поверхности (КИП) определялся из

Таблица 3
Результаты измерений характеристик РТ 1.8 (при угле места 15°)

$T_{пр}$, К	$T_{сист}$, К	SEFD, Ян	ΔF , Ян	КИП	$A_{эфф}$, м ²	$\Delta\theta_{3дБ}$, °
427	442	718000	1370	0.63	1.69	4

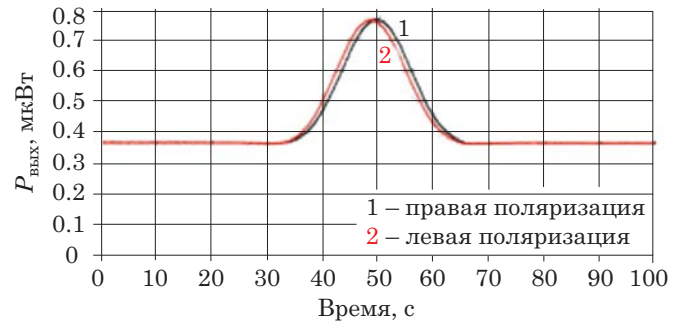


Рис. 6. Результат сканирования Солнца на РТ-1.8 по часовому углу одновременно в двух круговых поляризациях

соотношения SEFD и шумовой температуры системы $T_{сист}$. ДН радиотелескопа измерялась при сканировании Солнца.

Результаты измерений характеристик РТ-1.8 при угле места 15° приведены в табл. 3. SEFD радиотелескопа составил 718000 Ян, чувствительность при времени усреднения 0.1 с составила $\Delta F = 1370$ Ян. КИП РТ-1.8 — 0.63, что соответствует расчётному значению. Эффективная площадь антенны $A_{эфф} \sim 1.69$ м².

Ширина ДН по уровню половинной мощности $\Delta\theta_{3дБ}$ РТ 1.8 измерена при сканировании Солнца одновременно в двух круговых поляризациях (рис. 6) по часовому углу и склонению со скоростью 0.3 град/с и составила $\Delta\theta_{3дБ} = 4^\circ$ в обеих плоскостях, что соответствует теоретическим расчётам. На рис. 6 заметен сдвиг максимума ДН в каналах поляризаций на 0.3° (7.5 % от ширины ДН), что обусловлено конструкцией облучателя и будет минимизировано в модернизированной версии облучателя. Результаты измерений характеристик РТ 1.8 (при угле места 15°) представлены в табл. 3

Заключение

Для измерения интенсивности и степени поляризации солнечного излучения на частоте 2.8 ГГц в ИПА РАН создан новый радиотелескоп на базе антенны диаметра 1.8 м. Точность сопровождения и скорость поворота антенной системы РТ-1.8 позволяют не только сопровождать Солнце, но и выполнять быстрое сканирование в целях измерения параметров радиотелескопа. Приемная система с системой регистрации позволяют одновременно регистрировать две круговых поляризации с чувствительностью 0.8 К при времени усреднения 0.1 с. Чувствительность радиотелеско-

па при времени усреднения 0.1 с составила 1370 Ян. Первые наблюдения Солнца на радиотелескопе РТ-1.8 подтвердили основные расчетные характеристики радиотелескопа РТ-1.8.

Литература

Кузьменко И. В., Михалина Ф. А., Капустин Б. А. Радиотелескоп РТ-2 Уссурийской астрофизической обсерватории: современное состояние и данные наблюдений // Известия вузов. Радиофизика. 2008. Т. LI, № 12. С. 1005–1010.

Лесовой С. В., Алтынцев А. Т., Занданов В. Г. и др. 10-антенный макет радиогелиографа на базе сибирского солнечного радиотелескопа // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12, т. 1. С. 71–73.

Australian Government. Bureau of Meteorology. Australian Space Weather Forecasting Centre [Электронный ресурс]. URL: https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/10 (дата обращения: 09.05.2022).

Benz A. O., Monstein C., Meyer H. Callisto — a new concept for solar radio spectrometers // Solar Phys. 2005. Vol. 226, iss. 1. P. 143–151.

Space Weather Canada. Solar radio flux [Электронный ресурс]. URL: <https://spaceweather.ca/forecast-prevision/solar-solaire/solarflux/sx-5-flux-en.php> (дата обращения: 09.05.2022).

Tapping K. F., Morton D. C. The next generation of Canadian solar flux monitoring // Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 440. 012039. doi:10.1088/1742-6596/440/1/012039.