
КОРРЕКЦИЯ НАВЕДЕНИЯ АНТЕНН СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА**CORRECTION FOR POINTING ERRORS
OF SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH ANTENNAS****М.В. Глоба** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, globa@iszf.irk.ru***А.В. Губин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, lgubin@mail.ru***С.В. Лесовой***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, svlesovoi@gmail.com***M.V. Globa***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, globa@iszf.irk.ru***A.V. Gubin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS
Irkutsk, Russia, lgubin@mail.ru***S.V. Lesovoi***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, svlesovoi@gmail.com*

Аннотация. Для радиоинтерферометров точность наведения антенн крайне важна, поскольку отклонение направления максимума диаграммы направленности от источника не только снижает уровень сигнала, но и приводит к неверному измерению фаз видностей. Эти искажения не поддаются коррекции на этапе обработки данных и снижают динамический диапазон изображений. Суть метода измерений заключается в определении отклонения направления максимума диаграммы направленности от центра Солнца для разных значений азимута и высоты и фитировании полученной зависимости моделью, разработанной для альт-азимутальных монтировок. Модель позволяет определить отклонение оси опорно-поворотного устройства от направления в зенит, неортогональность осей азимута и высоты, вынос облучателя по азимуту, константы по азимуту и высоте. Механическая юстировка этих параметров с заданной точностью невозможна, поэтому коррекция проводилась путем внесения поправок на каждый момент времени для каждой антенны. С помощью описанной методики удалось добиться точности наведения антенн порядка 2 угл. мин.

Ключевые слова: солнечный радиотелескоп, наведение альт-азимутальных монтировок.

Abstract. For radio interferometers, antenna pointing accuracy is critical, as deviations in the direction of the beam from the source not only reduce the signal level, but also lead to incorrect measurements of visibility phases. These distortions cannot be corrected during data processing and reduce the dynamic range of images. The measurement method involves determining the deviation of the beam from the center of the Sun for different azimuth and elevation angles and fitting the resulting dependence using a model developed for altazimuth mounts. The model allows us to determine the deviation of the mount axis from the zenith direction, the non-orthogonality of the azimuth and elevation axes, the azimuth offset of the feed, and the azimuth and elevation constants. Mechanical adjustment of these parameters with the specified accuracy is impossible, so the correction was performed by introducing corrections to each moment in time for each antenna. Using the described technique, we managed to achieve an antenna pointing accuracy of approximately 2 arcmin.

Keywords: solar radio telescope, pointing of altazimuth mounts.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение и корректировка точности наведения антенн — один из ключевых этапов настройки оборудования радиотелескопа. Точность наведения антенн прямым образом влияет на качество и достоверность изображений, получаемых с помощью апертурного синтеза. Если для одиночной антенны приемлемой считается точность 1/10 ширины диаграммы направленности (ДН), то для синтезирующих телескопов требования еще выше, поскольку неточное наведение приводит к недостоверному измерению видностей и, соответственно, к искажениям изображения. Например, при ошибке наведения 10 угл. мин ошибка в определении фазы видности, соответствующей самым коротким антенным базам, будет со-

ставлять 10°. Это на порядок выходит за пределы точности измерения фаз, которая требуется для достижения динамического диапазона изображений 40 дБ, необходимого для наблюдения солнечных вспышек. Другими словами, ошибки в наведении индивидуальных антенн приводят к тому, что измеренные видности и истинное распределение яркости по углу перестают быть связанными преобразованием Фурье [Томпсон и др., 2003], соответственно, достоверность изображения снижается.

АНТЕННЫ СРГ

Сибирский радиогелиограф (СРГ) представляет собой три Т-образные антенные решетки, работающие в диапазонах частот 3–6, 6–12 и 12–24 ГГц и прини-



Рис. 1. Антенна решетки 3–6 ГГц СРГ

мающие обе круговые поляризации (right/left circular polarization, RCP/LCP) [Алтынцев и др. 2020]. Антенны СРГ — прямофокусные параболические рефлекторы, установленные на альт-азимутальных опорно-поворотных устройствах (ОПУ) (рис. 1). Параметры антенн СРГ приведены в табл. 1. На СРГ методика введения поправок на основе анализа отклика опробована впервые, поскольку на предыдущих инструментах (СРГ-48, СРГ-10, ССРТ) использовались ОПУ другого типа и система управления не позволяла вносить индивидуальные поправки для каждой антенны. Управление антеннами СРГ осуществляется путем загрузки в блок управления каждой антенны таблицы координат, рассчитанных с интервалом 1 с, после чего антенна осуществляет автономное движение в соответствии с этой таблицей. При расчете таблиц учитывается атмосферная рефракция [Holleman, Huuskonen, 2003].

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для альт-азимутальных монтажей антенн, используемых в радиоастрономии, развита методика определения параметров ОПУ, влияющих на наведение, по анализу измеренных отклонений максимума ДН от направления на известный радиоастрономический объект при разных значениях азимута и высоты [de Vicente, Barcia, 2007; Mangum, 2001; Sun et al., 2019]. Модель представляется в следующем виде:

$$\Delta A = P_1 + P_2 \sec h + P_3 \tan h + P_4 \tan h \cos A + P_5 \tan h \sin A, \quad (1)$$

$$\Delta h = P_7 - P_4 \sin A - P_5 \cos A + P_8 \sin h + P_9 \cos h, \quad (2)$$

где A, h — азимут и высота соответственно; $\Delta A, \Delta h$ — ошибки по азимуту и высоте; параметры ОПУ P_i перечислены в табл. 2.

Параметр P_6 — вынос облучателя по высоте — отсутствует в модели, поскольку он выражается в постоянной ошибке по высоте и не отличим от параметра P_7 . Гравитационные эффекты не учитываются вследствие малой массы зеркал. Как правило, при измерении ошибок наведения выбирают несколько источников в разных частях небесной сферы и сопровождают их, периодически измеряя отклонение максимума ДН. Измеренные параметры ОПУ затем могут быть использованы либо для расчета поправок к координатам источника, либо для физической юстировки, если это позволяет конструкция ОПУ и крепления облучателя. Для СРГ единственным объектом наблюдения является Солнце вследствие малой собирающей площади отдельных антенн. Это накладывает ограничения на диапазон углов, для которых можно измерить ошибки наведения, поэтому измеренные с помощью модели параметры могут не вполне соответствовать физическим параметрам ОПУ. Тем не менее рассчитанные поправки к координатам будут валидны, поскольку измерены для той части небесной сферы, в которой ведется наблюдение.

Измерения ошибок наведения проводились вблизи летнего солнцестояния для того, чтобы захватить наибольший диапазон изменения азимута и высоты. В течение дня наблюдений каждые 10 мин антенны отводились от центра Солнца по азимуту и высоте и измерялись отклонения максимума ДН от направления на центр Солнца $\Delta A, \Delta h$ для каждой антенны. Поведение отклонений за день для антенны E3040 показано на левой панели рис. 2 цветными линиями, а черными линиями показан результат аппроксимации вышеописанной моделью. На основании полученных параметров модели были рассчитаны индивидуальные таблицы наведения для каждой антенны — на каждый момент времени к координатам центра Солнца прибавляется соответствующая поправка. Для оценки результата были проведены контрольные измерения тем же способом (с отведением антенн от центра Солнца каждые 10 мин в течение всего дня наблюдений). Результат для антенны E3040 показан справа на рис. 2. Разброс ошибок для всех антенн решетки 3–6 ГГц до и после коррекции показан на рис. 3. Разброс удалось уменьшить с 6 до 2 угл. мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В отличие от рутинного режима, когда наблюдение ведется на 16 частотах с временным разрешением около 3.5 с, при проверке наведения СРГ работал в режиме трех частот для повышения временного разрешения и улучшения точности определения отклонений ДН. Таким образом, получены данные о наведении антенн каждой решетки на начальной, средней и конечной частоте соответствующего диапазона в двух круговых поляризациях. На рис. 4 показан разброс направлений ДН в разных поляризациях. На решетках 3–6 и 6–12 ГГц наблюдается смещение ДН на последней частоте (5.6 и 11.8 ГГц

Таблица 1

Параметры антенн СРГ

Параметр	СРГ 3–6 ГГц	СРГ 6–12 ГГц	СРГ 12–24 ГГц
Количество антенн	127	192	207
Диаметр антенн, м	3	2	1
f/D	0.4	0.4	0.8
Ширина ДН, град.	2–1	1.6–0.8	1.6–0.8

Таблица 2

Параметры ОПУ, определяемые с помощью модели наведения

P_1	Ошибка энкодера азимута. Положительное значение соответствует большим значениям азимута
P_2	Вынос облучателя по азимуту. Положительное значение соответствует большим значениям азимута
P_3	Неортогональность между осями азимута и высоты
P_4	Отклонение оси азимута ОПУ в направлении восток–запад. Положительное значение соответствует отклонению на восток
P_5	Отклонение оси азимута ОПУ в направлении север–юг. Положительное значение соответствует отклонению на юг
P_7	Ошибка энкодера высоты. Положительное значение соответствует большим высотам
P_8, P_9	Гравитационный эффект

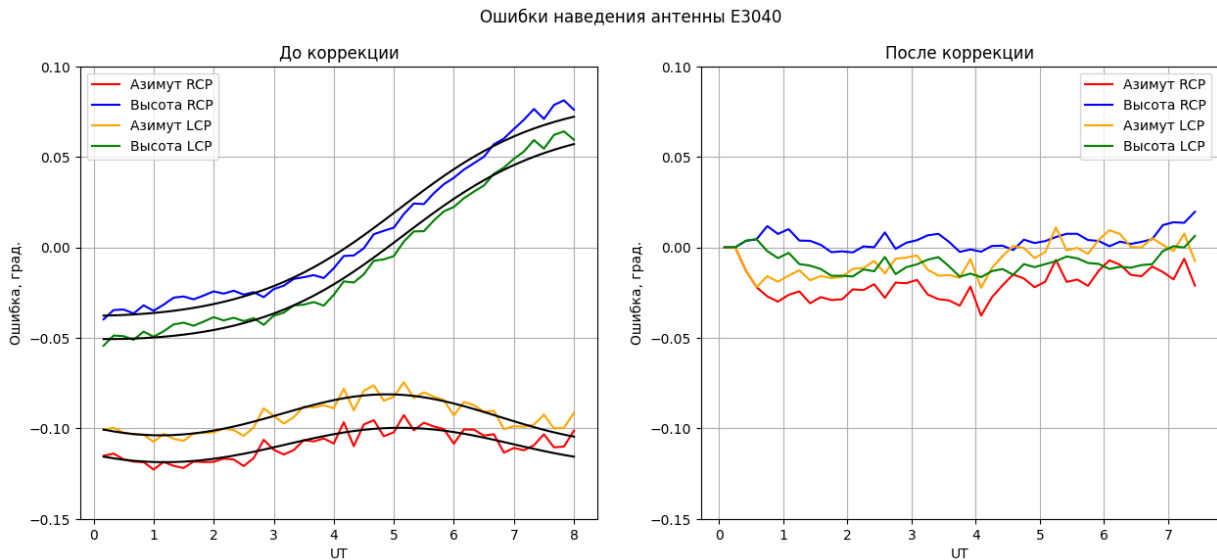


Рис. 2. Ошибки наведения антенны E3040 до (слева) и после (справа) коррекции параметров ОПУ. По оси Y отложены азимут и высота в градусах. Черными линиями на левой панели показан результат аппроксимации. Коррекция выполнена путем расчета индивидуальных таблиц наведения для каждой антенны

соответственно) преимущественно по азимуту на ~3 угл. мин. На решетке 12–24 ГГц такого смещения не наблюдается, поскольку самая высокая частота измерений составляет 20 ГГц, в то время как в рутинном режиме наблюдения ведутся на частотах вплоть до 23.4 ГГц. Такой выбор частот обусловлен тем, что сигнал на частотах выше 20 ГГц подвержен влиянию шумов. На рис. 5 показан разброс направлений ДН на разных частотах. Видно, что на нижней и средней частоте каждого диапазона различия также не превышают 2 угл. мин для большей части антенн. Более значительные отклонения наблюдаются только на верхней частоте диапазонов 3–6 и 6–12 ГГц. Можно сделать вывод о том, что отличие в направлении максимума ДН в разных поляризациях для подавляющего большинства антенн СРГ не превышает 2 угл. мин в большей части диапазона.

Неточности в наведении антенн СРГ порождают нефакторизуемые фазовые ошибки измерения видимостей, которые не устраняются калибровкой коэффициентов передачи антенн. Причина появления таких ошибок в том, что неточности наведения вносят асимметрию в отклик двухэлементного интерферометра. Для оценки влияния ошибок наведения на получаемое изображение рассмотрим формирование отклика двухэлементного интерферометра с учетом отклонений в наведении. Обозначим аналитические сигналы на выходах антенн k, l как Z_k, Z_l . Тогда действительная часть измеряемой видимости

$$\text{Re} \langle Z_k Z_l^* \rangle_t = \left\langle \int_{4\pi} A_k(\theta) E_k(\theta, t) d\theta \times \int_{4\pi} A_l(\theta) E_l(\theta, t) d\theta \cos(2\pi u \theta) \right\rangle_t, \tag{3}$$

где θ — угол в радианах; E — распределение радиояркости по углу; A — диаграмма направленности ан-

Ошибки наведения решетчат 3-6 ГГц

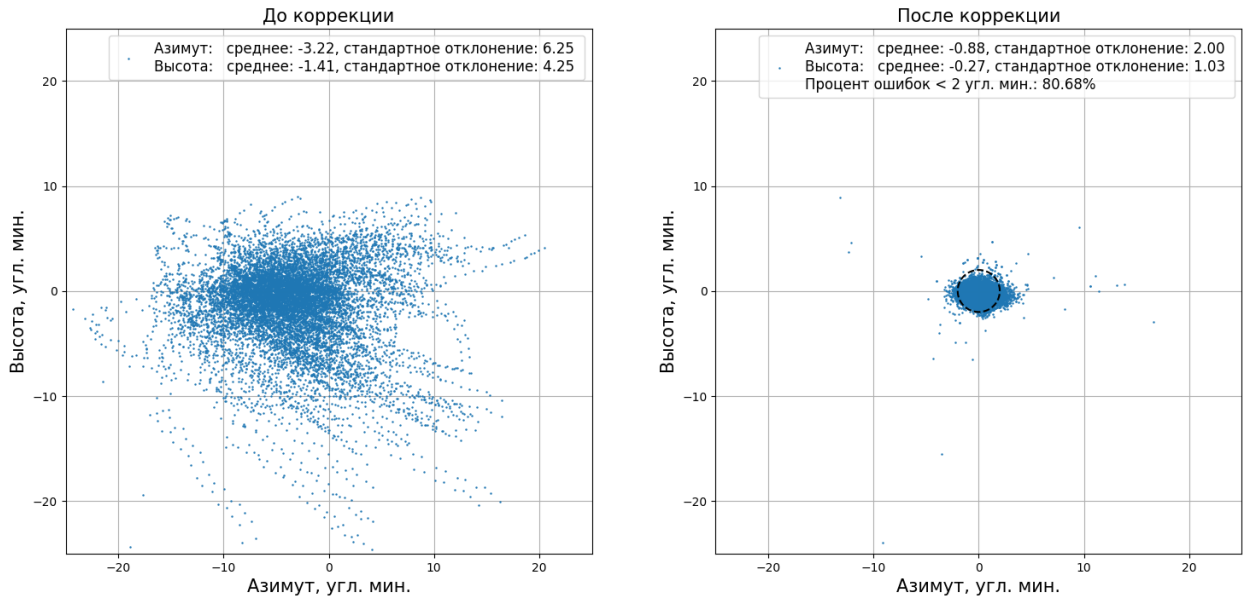


Рис. 3. Ошибки наведения всех антенн решетчат 3–6 ГГц за весь день измерений в обеих круговых поляризациях на частоте 3 ГГц: слева — до коррекции, справа — после коррекции; вверху приведены статистические параметры каждого распределения. На правой панели черными штрихами показана окружность радиусом 2 угл. мин, в которую попадают 80 % всех отклонений

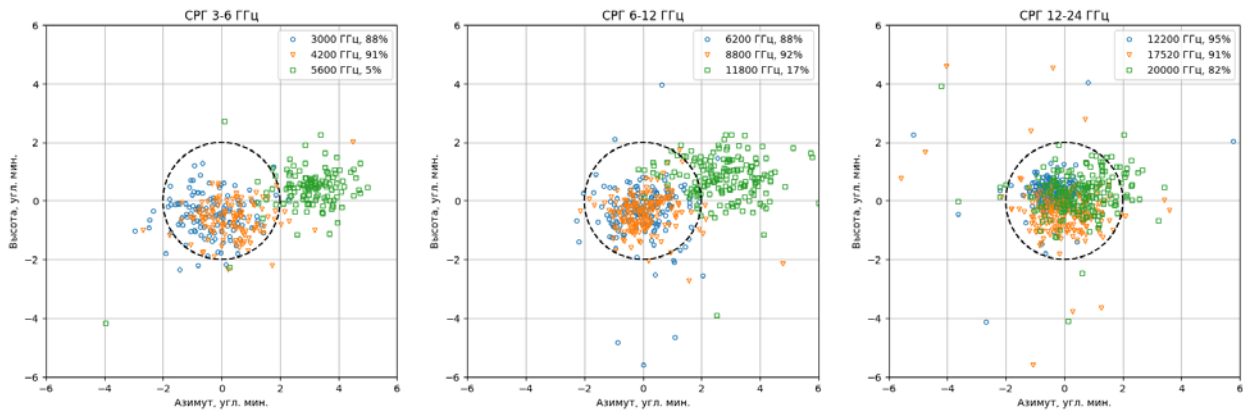


Рис. 4. Разница в направлении ДН антенн в двух поляризациях для трех решетчат SRG. Каждый символ соответствует определенной антенне и показывает, как будет отклонена ДН в левой поляризации, если в правой она будет направлена в начало координат. Частоты показаны цветом; рядом указан процент точек, находящихся внутри окружности радиусом 2 угл. мин (черные штрихи)

тены; $u = b_{kl} / \lambda$ — пространственная частота, соответствующая антенной базе и рабочей длине волны. С учетом эргодичности $E(\theta, t)$ (физически это значит, что распределение радиояркости по углу пространственно некогерентно, а частота дискретизации превышает удвоенную полосу рабочих частот) выражение (3) можно представить как

$$\text{Re} \langle Z_k Z_l^* \rangle_t = \int A_k(\theta) A_l(\theta) I(\theta) \cos(2\pi u \theta) d\theta, \quad (4)$$

где $I = \langle E_k E_l^* \rangle_t$ — распределение интенсивности по углу. Аналогичное выражение можно вывести для мнимой части измеряемой видности:

$$\text{Im} \langle Z_k Z_l^* \rangle_t = \int A_k(\theta) A_l(\theta) I(\theta) \sin(2\pi u \theta) d\theta. \quad (5)$$

Допустим, что $I(\theta)$ является симметричной функцией. Тогда фаза измеренной видности должна быть равна 0. Если ошибки наведения антенн $\Delta\theta_k, \Delta\theta_l$ не компенсируют друг друга, выражение $A_k(\theta + \Delta\theta_k) A_l(\theta + \Delta\theta_l)$ будет асимметричным и в измеренной видности появится фазовая ошибка. Поскольку диаграммы антенн входят в подынтегральное выражение, эта ошибка нефакторизуемая — ее нельзя представить парой множителей, зависящих от номера антенн. Ошибки такого рода оказывают влияние и на результаты калибровки коэффициентов передачи антенн, и на результирующее изображение. Количество влияние подобных ошибок можно описать через динамический диапазон изображения [Perley, 1999] $D \approx N / \Delta\phi$, где N — число антенн радиоинтерферометра; $\Delta\phi$ — фазовый шум измеренных видностей. Моделирование выражений (4) и (5) показало,

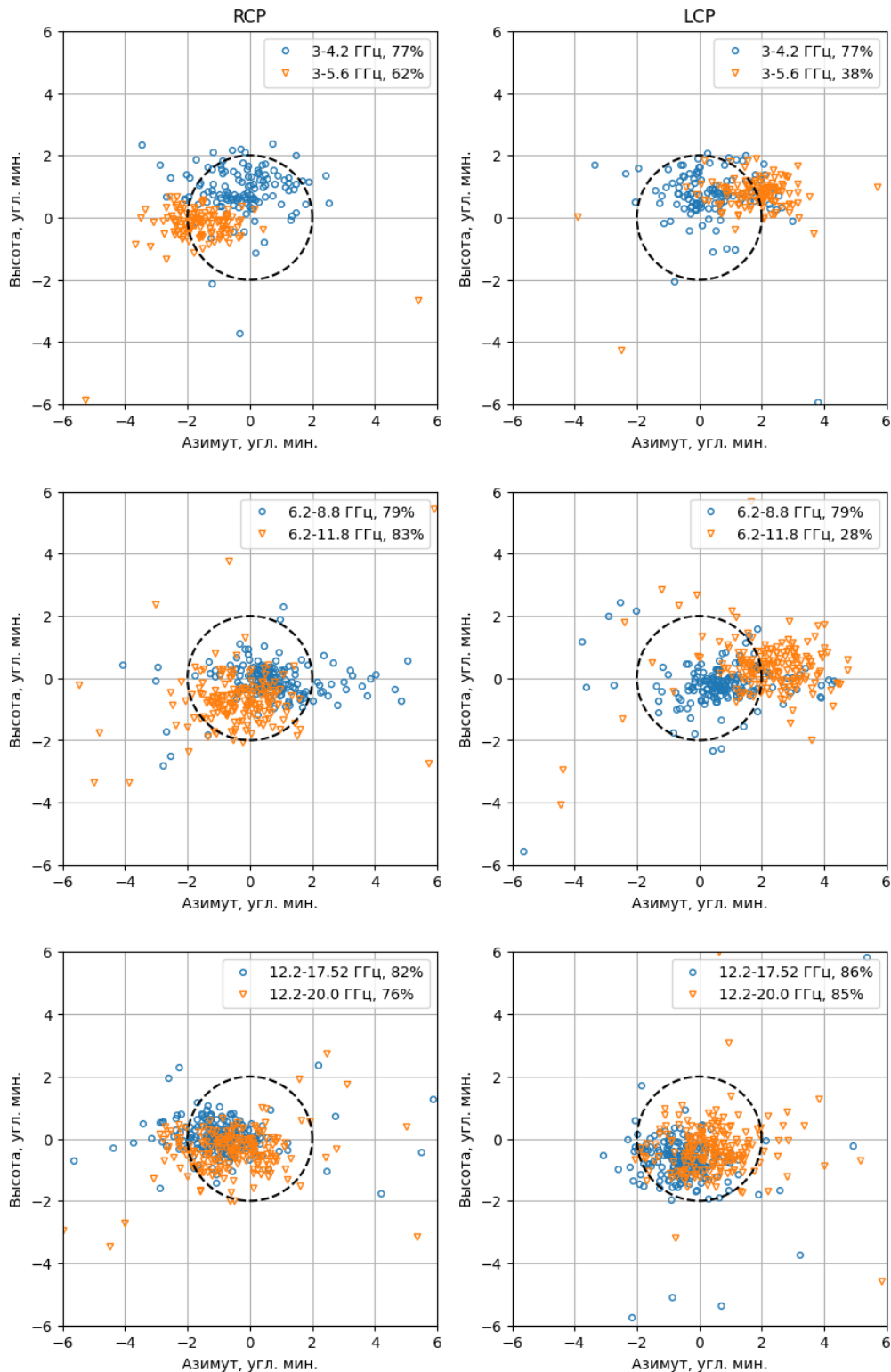


Рис. 5. Разница в направлении ДН антенн на разных частотах для правой (слева) и левой (справа) поляризации: верхние панели — решетка 3–6 ГГц, средние — 6–12 ГГц, нижние — 12–24 ГГц. Каждый символ соответствует одной антенне и показывает, как будет отклонена ДН на средней (синий) или верхней (оранжевый) частоте, если на нижней частоте диапазона ДН будет направлена в начало координат. В правом верхнем углу каждой панели указан процент точек, находящихся внутри окружности радиусом 2 угл. мин (черные штрихи)

что фазовая ошибка $\Delta\varphi$ видностей пяти самых коротких антенных баз, используемых для калибровки, при ошибке наведения 2 угл. мин составит от 2° до 10° . Такие фазовые ошибки будут ограничивать динамический диапазон изображений до ~ 30 – 35 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана методика измерения ошибок наведения антенн СРГ и их коррекции путем внесения поправок в координаты для каждой антенны.

С помощью коррекции удалось существенно улучшить точность наведения и, соответственно, качество и достоверность получаемых данных. Учитывая разброс направлений ДН на разных частотах и в разных поляризациях, можно сделать вывод о том, что 2 угл. мин — предельно достижимая точность наведения для СРГ. При такой точности наведения можно ожидать, что фазовые ошибки в видностях коротких баз, используемых для калибровки, будут на уровне нескольких градусов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. СРГ является Уникальной научной установкой «Радиогелиограф» [<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138190/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020, № 2, с. 37–50. <https://doi.org/10.12737/szf-62202003> / Altynsev A.T., Lesovoi S.V., Globa M.V., et al. Multiwave Siberian Radioheliograph. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 30–40. <https://doi.org/10.12737/stp62202003>.
- Томпсон А.Р., Моран Дж.М., Свенсон Дж.У. *Интерферометрия и синтез в радиоастрономии*. М.: Физматлит, 2003, 624 с.
- Holleman I., Huuskonen A. Analytical formulas for refraction of radiowaves from exoatmospheric sources. *Radio Sci.* 2013, vol. 48, iss. 3, pp. 226–231. <https://doi.org/10.1002/rds.20030>.
- de Vicente P., Barcia A. *Deconstructing a pointing model for the 40M OAN radiotelescope (Technical report)*. 2007, 25 p. URL: <https://icts-yebes.oan.es/reports/doc/IT-OAN-2007-26.pdf> (дата обращения 17 февраля 2026 г.).
- Mangum J.G. *ALMA Memo 366: A Telescope Pointing Algorithm for ALMA*. 2001, 21 p. URL: <https://legacy.nrao.edu/alma/memos/html-memos/alma366/memo366.pdf> (дата обращения 17 февраля 2026 г.).
- Perley R.A. High Dynamic Range Imaging. *Synthesis Imaging in Radio Astronomy II. ASP Conference Series*. 1999, vol. 180, p. 275.
- Sun Zh., Wang J., Wang G. The establishment of pointing model for the Shanghai VGOS Radio Telescope. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1288, iss. 1, 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1288/1/012027>. URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138190/> (дата обращения 17 февраля 2026 г.).
- Как цитировать эту статью:*
ГлобаМ.В., ГубинА.В., Лесовой С.В. Коррекция наведения антенн Сибирского радиогелиографа. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 2, с. 124–129. <https://doi.org/10.12737/szf-122202613>.