

## ИЗМЕРЕНИЕ ЗАДЕРЖЕК В ПРИЕМНОМ ТРАКТЕ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

### MEASUREMENT OF SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH CABLE DELAYS

**С.В. Лесовой**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, svlesovoi@gmail.com*

**М.В. Глоба**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, globa@iszf.irk.ru*

**S.V. Lesovoi**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, svlesovoi@gmail.com*

**M.V. Globa**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, globa@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Для достижения максимального динамического диапазона радиоизображений Солнца, получаемых с помощью апертурного синтеза в относительно широких полосах частот 0.1–0.5 % от центральной частоты, необходимо корректировать задержки распространения сигналов в приемном тракте до вычисления функций видности (далее видности). Обычно корректируются уже измеренные значения видностей, что приводит к потерям в отношении сигнал/шум из-за остаточных фазовых наклонов в полосе частот приемной системы. Кроме достижения максимального динамического диапазона, предварительная коррекция задержек упрощает построение изображений в реальном масштабе времени, поскольку не требуется калибровка коэффициентов передачи антенн. Дополнительно к этому снижаются требования к точности установки антенн — в отличие от измерения фазовой ошибки видности, измерение задержки фактически не критично к ошибкам положения антенн, большим, чем длина волны принимаемого излучения. Мгновенная полоса частот Сибирского радиогелиографа, определяющая минимальный шаг измерения фазового наклона, а следовательно, точность определения задержки, составляет 10 МГц. При скорости света в оптическом кабеле порядка  $0.7c$  шаг 10 МГц позволяет однозначно измерять разность электрических длин кабелей до 20 м и соответственно, выполнять юстировку антенн по данным радионаблюдений, даже если ошибка положения антенн превышает рабочую длину волны. Коррекция линейной зависимости фазы от частоты в течение всего времени наблюдений адаптирует приемную систему к изменениям задержек во времени из-за температурных перепадов и приводит к общему уменьшению разброса фаз коэффициентов передачи антенн. Это, в свою очередь, приводит к более устойчивым решениям систем уравнений, содержащих в качестве неизвестных коэффициенты передачи антенн.

**Ключевые слова:** радиотелескоп, апертурный синтез, радиоизображение.

**Abstract.** To achieve the maximum dynamic range of solar radio images obtained using aperture synthesis in relatively wide frequency bands 0.1–0.5 % of the operating frequency, it is necessary to compensate the signal propagation delays in the antenna receive path before calculating visibility functions (hereinafter visibilities). When visibilities are corrected without delay compensation, the signal-to-noise ratio decreases due to residual phase slopes in the receiving system bandwidth. In addition to enhancing dynamic range, preliminary compensation for delays simplifies real-time imaging — no antenna gain calibration is required to get a first approximation image. The requirements for the accuracy of antenna placement are also reduced — in contrast to the measurement of the phase visibility error, the measurement of the delay is actually not so critical to the antenna position errors that are larger than the operating wavelength. The instantaneous frequency band of the Siberian Radioheliograph, which determines the minimum step for measuring the phase slope, and hence the accuracy of determining the delay, is 10 MHz. At the speed of light in an optical fiber of  $\sim 0.7c$ , a step of 10 MHz makes it possible to unambiguously measure the difference between electrical lengths of cables up to 20 m and to correct antenna positions by radio observations, even if the error in the position of the antennas exceeds the operating wavelength. Correction of the band phase slopes during the observation time adapts the radio telescope to the temperature drift of delays and decreases antenna gain phase spread. This, in turn, leads to more stable solutions to systems of equations containing antenna gains as unknowns.

**Keywords:** radio telescope, aperture synthesis, radio image.

## ВВЕДЕНИЕ

Качество изображений получаемых радиотелескопами, использующими апертурный синтез, существенно зависит от калибровок комплексных коэф-

фициентов передачи элементов антенной решетки. Без определения амплитудных и особенно фазовых ошибок коэффициентов передачи получить можно только очень грубое изображение, а чаще всего некалиброванные данные невозможно считать изоб-

ражением. Критерием качества полученного изображения принято считать его динамический диапазон — определяемый как отношение самой яркой детали изображения к шумам в части изображения, свободной от излучения. Обусловлено это тем, что невязки, возникающие при реконструкции (чистке) изображения линейно связаны с ошибками в фазах и амплитудах видностей [Perley, 1999]. Рассмотрим невязки, вызванные фазовыми ошибками коэффициентов передачи антенн:

$$R_{\phi} = 2\Delta\phi \sin(2\pi ul), \quad (1)$$

где  $\Delta\phi$  — фазовая ошибка данной видности в радианах;  $u$  — пространственная частота;  $l$  — направляющий косинус. Если ошибки равномерно распределены по всем антеннам, соответственно по всем видностям, динамический диапазон изображения зависит от фазовых ошибок следующим образом [Perley, 1999]:

$$D = \frac{N}{\sqrt{2}\Delta\phi}, \quad (2)$$

где  $N$  — число антенн в антенной решетке. Необходимо отметить, что данная формула подразумевает, что в построении изображения используются все  $N(N-1)/2$  видности  $N$ -антенной решетки. Для СРГ, содержащего 48 антенн [Лесовой и др., 2017],  $N$  в соотношении (2) должно быть 32, а не 48 в силу того, что для построения изображения СРГ используются не все возможные видности, а только перекрестные. Их число  $2 \times 16 \times 32 = 1024$ , что соответствует числу антенн 32 в данной формуле. Для того, чтобы наблюдать солнечный диск во время мощной активности требуется динамический диапазон не менее  $10^4$ . Например, при максимальной яркостной температуре  $2.5 \cdot 10^7$  К, яркостной температуре солнечного диска  $2 \cdot 10^4$  К и уровне невязок относительно солнечного диска 0.1 уровень фазовых ошибок должен быть не более  $0.05^\circ$ , что соответствует максимально допустимой разности в длинах кабелей  $dl = c_f \Delta\phi / (\pi \Delta\nu) = 1$  см, где  $c_f = 0.7c$  — скорость света в волокне,  $\Delta\nu = 10$  МГц — полоса рабочих частот СРГ. Требуемый уровень ошибок сравним с ошибками, появляющимися под влиянием нефакторизуемых множителей на результат измерения видностей и не устраняется общепринятыми методами калибровок. Поэтому компенсация разностей длин кабелей должна быть выполнена до вычисления видности. Альтернативой было бы использование спектрального коррелятора со сверхузкой полосой частотного канала  $\sim 0.002\%$ . В этом случае можно было бы корректировать задержки в каждом канале после измерения видности, а затем формировать рабочую полосу. В ближайшем будущем создание спектрального коррелятора для СРГ не рассматривается. В данной работе предлагается адаптивный алгоритм коррекции разностей длин кабелей до вычисления видностей в корреляторе и приводятся результаты применения такой коррекции сигналов СРГ.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим приемный тракт солнечного радиointерферометра на примере Сибирского радиогео-

лиографа (СРГ) [Алтынцев, 2020; Лесовой и др., 2017; Lesovoi et al., 2012]. Сигналы от антенн СРГ передаются в рабочее здание по аналоговым оптическим линиям. В антенном модуле микроволновый сигнал модулирует мощность излучения полупроводникового лазера. Далее оптический сигнал по одномодовому оптоволокну передается на фотодетектор, сигнал на выходе которого пропорционален исходному микроволновому сигналу, задержанному на время распространения сигнала в оптоволокну. При разработке оптических линий СРГ было определено, что длины всех линий должны составлять 375 м. Равенство длин минимизирует влияние дисперсии при передаче сигналов от антенн к приемникам, а длина 375 м достаточна для того, чтобы достичь любой из антенн СРГ. Измерения длин кабелей с помощью рефлектометра показало, что реальная разница в электрических длинах кабелей может достигать 5 м. При разнице длин  $\Delta l = 2 \div 5$  м и скорости света в волокне  $c_f = 0.7c$  уменьшение коэффициента корреляции будет  $\text{sinc}(\Delta\nu \Delta l / c_f) = 2 \div 10\%$  [Walker, 1999], где  $\Delta\nu$  — полоса частот СРГ, равная 10 МГц. Для достижения максимального динамического диапазона изображений СРГ разницу в длинах кабелей нужно корректировать. На результат измерения видности влияет то, что при таких задержках фаза видности многократно меняется на  $2\pi$  в полной полосе частот СРГ, равной 4 ГГц. Это ведет к сильным фазовым шумам при измерении видностей, зависящих от частоты и времени. Более того, различные фазовые наклоны в рабочих полосах частот антенн ведут к ошибкам в видностях, которые нельзя компенсировать путем калибровок за счет избыточности антенной решетки (redundancy) или самокалибровкой (self-calibration) [Cornwell, Fomalont 1989]. Калибровки сводятся к тем или иным методам решения системы уравнений вида [Thompson et al., 2017]

$$\hat{V}_{kl} = g_k g_l^* G_{kl} V_{kl} + \epsilon_{kl} + n_{kl}, \quad (3)$$

где  $\hat{V}_{kl}$  — измеренная видность;  $g$  — коэффициенты передачи сигнала в тракте антенны;  $G_{kl}$  — нефакторизуемый коэффициент передачи (не раскладывающийся на множители, связанные с антеннами);  $V_{kl}$  — истинная видность;  $\epsilon_{kl}$  — аддитивные шумы коррелятора;  $n_{kl}$  — тепловой шум. Обычный путь решения системы (3) состоит в том, чтобы аппаратными способами уменьшить влияние членов  $G_{kl}$ ,  $\epsilon_{kl}$ ,  $n_{kl}$  и решать ее в виде

$$\hat{V}_{kl} = g_k g_l^* V_{kl}. \quad (4)$$

Различные фазовые наклоны в трактах различных антенн проявляются в нефакторизуемой части коэффициента передачи  $G_{kl}$ , что не позволяет свести число неизвестных в системе к сумме числа антенн и числа видностей, т. е. сделать его меньше числа уравнений. Поэтому точность калибровок снижается. Как указано в работе [Liu et al., 2010], при больших фазовых ошибках в уравнении (3) невозможно получить точное решение для антенных коэффициентов передачи даже в отсутствие тепловых шумов. Изменение задержки распространения сигнала в оптово-

локне из-за температурного перепада составляет примерно 40–130 пс/(км °С). При дневных перепадах температуры в несколько десятков градусов, обычных для резко континентального климата в месте расположения СРГ, изменение задержки будет ~1 нс. Для наибольшей рабочей частоты СРГ 8 ГГц это соответствует восьми периодам. Это очень большая величина, даже с учетом того, что значение имеет только разница в изменениях задержки различных антенн. Поэтому адаптация коррекции задержек в тракте каждой антенны под их изменение во времени является целесообразной.

Для измерения длин кабелей можно использовать рефлектометр, но достигаемая точность (при использовании не сверхдорогого прибора) будет не лучше 10–20 см. Измерение зависимости фазы видности в полной полосе частот СРГ дает возможность измерить относительные длины кабелей более точно. В полной рабочей полосе частот СРГ  $\Delta v_{\text{RF}}=4$  ГГц разница в длине кабелей  $\Delta l=1$  см приводит к набегу фаз  $2\pi\Delta v_{\text{RF}}\Delta l/0.7c\approx 70^\circ$ . Чувствительности СРГ достаточно, чтобы при измерении видностей самых коротких антенных баз уверенно аппроксимировать фазовый наклон  $70^\circ/4$  ГГц и соответственно получить точность измерения электрической длины кабеля 1 см. Компенсация разницы длин кабелей, отслеживающая изменения, вызванные температурным дрейфом, устраняет проблемы, возникающие при составлении систем линейных уравнений для калибровки фаз. Один из способов линеаризации уравнения (4) — логарифмирование и использование действительной части логарифма для амплитудной калибровки, а мнимой части — для фазовой калибровки коэффициентов передачи  $g_k$ . Однако, если разница в длинах кабелей превышает длину волны, то при такой линеаризации возникают ошибки, вызванные неоднозначностью комплексного логарифма [Liu et al., 2010]. Для успешного нахождения решения с помощью метода наименьших квадратов должно выполняться условие

$$\text{Im}\left(\ln\left(\hat{v}_{kl}\right)\right)=\psi_{kl}+\phi_k-\phi_l<\pm\pi, \quad (5)$$

где слева фигурирует мнимая часть логарифма видности;  $\psi_{kl}$  — истинная фаза видности;  $\phi_k, \phi_l$  — фазы коэффициентов передачи  $g_k, g_l$ . Коррекция разницы в длинах кабелей минимизирует правую часть (5), что делает фазовую калибровку за счет избыточности более адекватной. Пожалуй, самым неприятным последствием невыполнения (5) является смещение изображения, вызванное изменяющимся во времени линейным наклоном фаз. Обычно изображения в разных поляризациях получают в разные моменты времени. Поэтому изображения в полной интенсивности и в круговой поляризации часто искажены различными смещениями изображений в левой и правой круговых поляризациях. Для устранения этих искажений необходимо центрировать каждое изображение — убирать линейные фазовые наклоны из распределений фазовых ошибок по антеннам, возникающие в процессе калибровки или использовать алгоритмы калибровки, зависящие от модели изображения. В случае, когда электрические длины кабелей изменяются во времени в основном из-за

температурных изменений коэффициента преломления оптического волокна [Hartog et al., 1979], наиболее сильные смещения будут в моменты, когда разность электрических длин близка к рабочей длине волны. Пусть фаза видности определяется только истинной фазой видности  $\psi_{kl}$  и задержками в кабелях  $\tau_k, \tau_l$  соответствующих антенн

$$\theta_{kl}=\psi_{kl}+2\pi v_n(\tau_k-\tau_l). \quad (6)$$

Рассмотрим измерение фазы при меняющихся во времени (например из-за температуры), задержках в оптоволокне. Измеренная фаза видности

$$\hat{\theta}_{kl}=(\psi_{kl}+2\pi v_n\Delta\tau_{kl}(t))\bmod 2\pi, \quad (7)$$

где  $v_n$  — рабочая частота;  $\Delta\tau_{kl}(t)$  — изменяющаяся во времени задержка. Скорость изменения задержки определяется скоростью изменения температуры окружающей среды в месте прокладки оптических кабелей. Практика показывает, что соответствующее изменение фазы видности на  $2\pi$ , происходит примерно за час в периоды максимальных перепадов температур окружающей среды. Для компенсации фазовых ошибок, вызванных температурным дрейфом, необходимо корректировать фазовые наклоны в трактах антенн не реже, чем каждые полчаса. Применение компенсации фазовых ошибок, вызванных изменением задержек в кабелях, позволяет получать первое приближение изображения в реальном времени, без применения длительных процедур калибровки коэффициентов передач. Измерение любой величины всегда происходит с некой конечной точностью. Не нарушая общности, мы можем положить, что точность измерения фазы определяется монотонностью изменения задержки, т. е., кроме плавного изменения задержки из-за температуры, имеет место шум задержки  $n_\tau$

$$\hat{\theta}_{kl}=(\psi_{kl}+2\pi v_n\Delta\tau_{kl}(t)+n_\tau(t))\bmod 2\pi. \quad (8)$$

Когда  $\Delta\tau_{kl}$  будет близко к целому числу периодов рабочей частоты  $M/v_n$ , фазовый шум будет максимальным из-за  $n_\tau(t)$  и деления по модулю. Как упоминалось выше, видности в различных круговых поляризациях измеряются в разные моменты времени. Соответственно различным может быть вклад фазового шума в решение для фазовых распределений в различных поляризациях. Уравнение (5) подразумевает, что в случае линейной эквидистантной решетки для фаз избыточных измеренных видностей, соответствующих самым коротким антенным базам, имеет место соотношение

$$\hat{\theta}_{k,k+1}=\psi_1+\phi_k-\phi_{k+1}, \quad (9)$$

где  $\psi_1$  — фаза, полученная на самой короткой базе (фаза первой гармоники пространственного спектра, измеряемого СРГ). Известным вектором является  $\vec{\theta}=[\hat{\theta}_{k,k+1}]$ , а искомым вектором —  $\vec{\phi}=[\psi_1, \phi_1, \dots, \phi_N]$ . Размерность вектора  $\vec{\theta}$  на 2 меньше размерности  $\vec{\phi}$ , поэтому соответствующая система уравнений (9) является недоопределенной и может быть решена методом наименьших квадратов.

Из (9) следует, что решение для фаз коэффициентов передачи антенн можно ожидать в виде

$$\phi_n = \Delta\psi_1(n-1) + \Delta\phi_1 - \sum_{k=1}^n \hat{\theta}_{k,k+1}, \quad (10)$$

где  $n$  — номер антенны в диапазоне  $1, \dots, N$ ;  $\Delta\psi_1$  — ошибка в нахождении фазы первой гармоники;  $\Delta\phi_1$  — ошибка нахождения фазы первой антенны. Множитель при  $n$  определяет линейный наклон фазового распределения. Ошибка фазового наклона, а значит и смещения между изображениями в различных поляризациях, определяется ошибкой измерения фазы видности. Рассмотрим решение (9) для случая линейной эквидистантной решетки, содержащей 32 антенны  $\vec{\theta} = \mathbf{M}\vec{\phi}$ , где  $\mathbf{M}$  — матрица размерностью [33, 31], описывающая преобразование  $\vec{\phi}$  в  $\vec{\theta}$ . В общем виде решением будет  $\vec{\phi} = \mathbf{P}\vec{\theta}$ , где  $\mathbf{P} = (\mathbf{M}^T\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}^T$  — псевдообратная матрица для  $\mathbf{M}$ . Выше мы определили вектор  $\vec{\phi}$  так, что фаза истинной видности является первым элементом этого вектора. Тогда оценка фазы истинной видности определяется скалярным произведением первой строки  $\mathbf{P}$  и вектора, содержащего фазы измеренных видностей  $\psi_1 = \mathbf{P}_0\vec{\theta}$ . Чтобы прояснить, чем определяется  $\Delta\psi_1$ , нужно показать, как именно вычисляется оценка  $\psi_1$ . Поскольку решение (9) методом наименьших квадратов сводится к перемножению псевдообратной матрицы и вектора измеренных видностей, а для данной антенной решетки псевдообратная матрица является константой, можно рассмотреть, что именно представляет собой  $\mathbf{P}_0$ . Если аппроксимировать зависимость значений элементов  $\mathbf{P}_0$  от номера элемента полиномом второй степени, получим  $\mathbf{P}_{0,k} = 0.00567974 + 0.00549652k - 0.00018322k^2$ , где  $k$  — номер элемента вектора  $\mathbf{P}_0$  или  $\vec{\theta}$ . Это значит, что оценка  $\psi_1$  является взвешенным средним от  $\vec{\theta}$ . Отклонение оценки  $\psi_1$  от истинной фазы видности зависит от уровня фазового шума, и влияние шума антенн на отклонение тем сильнее, чем антенна ближе к центру решетки.

Из вышесказанного следует, что алгоритм адаптивной коррекции разностей длин кабелей, передающих сигнал от антенн СРГ в рабочее здание, должен привести к более устойчивым решениям, получаемым в процессе фазовой коррекции измеренных видностей.

## РЕАЛИЗАЦИЯ

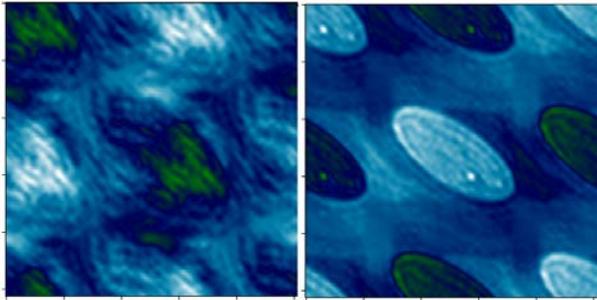
Измерение фазового наклона, соответствующего задержке распространения сигнала в оптоволокне, производится путем измерения зависимости фазы видности самой короткой антенной базы СРГ от частоты. При этом предполагается, что определяющий вклад в фазу видности вносит отклик на солнечный диск, и линейный наклон фазовой зависимости обусловлен именно задержкой в оптоволокне, а не солнечной активностью. Действительно, как упоминалось выше, разница в длинах кабелей 1 см приводит

к изменению фазы видности в полной полосе частот СРГ примерно на  $70^\circ$ . Чтобы получить такое изменение фазы за счет асимметричного расположения источника солнечной активности, нужно, чтобы источник микроволнового излучения, находящийся на солнечном лимбе, имел плотность потока на порядок больше, чем плотность потока от диска Солнца, либо такой источник должен иметь плотность потока, сравнимую с плотностью потока диска на минимальной пространственной частоте и возрастающую примерно на два порядка на максимальной пространственной частоте. Для спокойного Солнца в отсутствие вспышек это весьма маловероятно.

В качестве линейного наклона используется результат линейной регрессии зависимости фазы видности — частота. Нужно иметь в виду, что Солнце — протяженный источник, следовательно, его пространственный спектр вносит искажения в эту зависимость. Пространственный спектр спокойного Солнца близок к функции Бесселя первого рода, деленной на ее аргумент. Поэтому в спектре присутствуют минимумы, где модуль видности падает практически до нуля. При переходе через минимум при попадании на другой лепесток спектра фаза видности испытывает скачок на  $\pi$ . Эти особенности могут исказить зависимость фазы — частота и привести к неверной оценке задержки. Наиболее точный результат оценки задержки получается, когда видности данной базы на всех частотах не выходят за пределы одного из лепестков пространственного спектра.

Как упоминалось выше, разница в длинах кабелей СРГ  $\Delta l$  по оценкам, полученным с помощью рефлектометра, достигает значений 2–5 м. Поэтому первичное измерение фазовых наклонов нужно проводить с уменьшенным шагом перестройки частоты  $\delta\nu < c_f/\Delta l$ , чтобы значения фазы не выходили за пределы  $2\pi$  на одном шаге. После внесения первичных корректирующих задержек в приемный тракт, шаг перестройки по частоте можно увеличивать. Практика показывает, что эти первичные измерения однозначны при шаге 50 МГц, при том что в наблюдениях обычно используется шаг 100–200 МГц. Процедура внесения изменений в задержки должна быть накопительной: измеряется всегда текущая разница длин с учетом внесенных задержек. Результат коррекции фазовых наклонов в приемном тракте СРГ в реальном времени показан на рисунке. Отметим, что такая коррекция приводит к более стабильной калибровке при дальнейшей обработке данных СРГ. За счет уменьшения фазовых шумов легче решается задача совмещения изображений, полученных в различных поляризациях.

Для коррекции фазового наклона нужно применить комбинацию линий задержки, дробных сдвигов сигнала (на время меньше периода дискретизации) и управление фазой цифровых гетеродинов. Допустим, что сигнал принимается в верхней боковой полосе на частоте  $\nu_{USB}$ , задержка  $\Delta t$  измерена в пикосекундах, частота дискретизации сигнала составляет 100 МГц, шаг изменения задержки сигнала на выходе интерполирующего фильтра равен 0.1 нс. Шаг подстройки фазы цифрового гетеродина  $\Delta\phi = 0.3^\circ$ .



Результат учета разности длин кабелей СРГ. Показаны изображения в системе координат направляющих косинусов, получаемые в реальном масштабе времени без применения фазовой калибровки. Слева показано изображение без коррекции разности длин, справа с коррекцией длин (фазовых наклонов)

Процессор должен преобразовать заданную задержку  $\Delta\tau$  в  $\Delta\tau_n = N_1 10^4 + N_2 10^2$  и  $\Delta\phi_n = 1.2 \cdot 10^{-9} (\Delta\tau - \Delta\tau_n) v_{\text{USB}}$ , где  $N_1, N_2$  — число периодов частоты дискретизации и шаг интерполирующего фильтра соответственно. Фазовые ошибки, вносимые такой коррекцией, тем меньше, чем дальше обе антенны находятся от фазового центра решетки. Вносимый фазовый шум с учетом того, что у каждой базы подстройка происходит на обеих антеннах многократно в течение времени накопления (дальние антенны), определяется аналогично [Thompson, 2007, [http://www.ovsa.njit.edu/wiki/index.php/Calibration\\_Overview](http://www.ovsa.njit.edu/wiki/index.php/Calibration_Overview), [ftp://ftp.rao.istp.ac.ru/SRH/FASR/Thompson\\_Delay\\_Fringe\\_Phsw.pdf](ftp://ftp.rao.istp.ac.ru/SRH/FASR/Thompson_Delay_Fringe_Phsw.pdf)],  $\Delta\phi/6 \approx 0.12^\circ$ . Для пар, в которых обе антенны расположены близко к фазовому центру решетки, задержка меняется медленно относительно времени накопления. Поэтому фазовый шум (точнее, скачки фазы) может быть равен  $2\Delta\phi$ . Для того чтобы имело место усреднение шумов для всех видностей, фазовый центр антенной решетки должен быть расположен не в геометрическом центре решетки, а на краю или даже вне решетки. Реализация смещения фазового центра подразумевает, что ко всем значениям геометрических задержек антенн, меняющимся во времени, должны быть добавлены определенные постоянные значения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и реализован алгоритм измерения и коррекции задержек в антенных приемных трактах Сибирского радиогелиографа, адаптивный к изменениям электрических длин кабелей, вызванных температурным дрейфом. Для измерения задержек используется зависимость фазы измеренных функций видности избыточных пар антенн от частоты. Применение данного алгоритма позволяет компенсировать в реальном времени фазовые ошибки тракта, возникающие вследствие изменений электрических длин оптических кабелей и получить первичное изображение без применения алгоритмов калибровки коэффициентов передачи антенн (см. рисунок). С другой стороны, компенсация фазовых наклонов улучшает отношение сигнал/шум при измерении видностей и приводит к более устойчивым фазовым калибровкам при дальнейшей обработке изображения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на 2021 год № 075-00374-21-00 от 24.12.2020 «Методы и инструменты астрофизического эксперимента» (уникальный номер 0278-2021-0010, регистрационный номер ЦИТиС 121040600115-2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50. DOI: [10.12737/szf-62202003](https://doi.org/10.12737/szf-62202003).
- Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А. и др. Сибирский радиогелиограф: первые результаты. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 1. С. 3–16. DOI: [10.12737/23588](https://doi.org/10.12737/23588).
- Cornwell T., Fomalont E.B. Self-calibration. *Synthesis imaging in radio astronomy. A collection of Lectures from the Third NRAO Synthesis Imaging Summer School*. Astronomical Society of the Pacific Publ., 1989. Vol. 6. P. 185.
- Hartog A.H., Conduit A.J., Payne D.N. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibres. *Optical and Quantum Electronics*. 1979. Vol. 11. P. 265–273 DOI: [10.1007/BF00620112](https://doi.org/10.1007/BF00620112).
- Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F. Gubin A.V. The Multifrequency Siberian Radioheliograph. *Solar Phys*. 2012. Vol. 280, iss. 2. P. 651–661. DOI: [10.1007/s11207-012-0008-7](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0008-7).
- Liu A., Tegmark M., Morrison S. et al. Precision Calibration of Radio Interferometers Using Redundant Baselines. 2010. arXiv: 1001.5268 DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.17174.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17174.x).
- Perley R.A. High dynamic range imaging. *Synthesis Imaging in Radio Astronomy II. A Collection of Lectures from the Sixth NRAO/NMIMT Synthesis Imaging Summer School. ASP Conference Ser.* 1999. Vol. 180. P. 275. DOI: [1999ASPC..180..275P](https://doi.org/10.1006/aspc.1999.275P).
- Thompson A.R. Delay tracking, fringe rotation, and phase switching in FASR. FASR memo. 2007.
- Thompson A.R., Moran J.M., Swenson Jr. G.W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. Third Edition. Springer, 2017. DOI: [10.1007/978-3-319-44431-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44431-4).
- Walker R.C. Very Long Baseline Interferometry. *Synthesis Imaging in Radio Astronomy II. A Collection of Lectures from the Sixth NRAO/NMIMT Synthesis Imaging Summer School. ASP Conference Ser.* 1999. Vol. 180. P. 433. URL: [http://www.ovsa.njit.edu/wiki/index.php/Calibration\\_Overview](http://www.ovsa.njit.edu/wiki/index.php/Calibration_Overview) (дата обращения 20 марта 2021 г.). URL: [ftp://ftp.rao.istp.ac.ru/SRH/FASR/Thompson\\_Delay\\_Fringe\\_Phsw.pdf](ftp://ftp.rao.istp.ac.ru/SRH/FASR/Thompson_Delay_Fringe_Phsw.pdf) (дата обращения 20 марта 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Лесовой С.В., Глоба М.В. Измерение задержек в приемном тракте Сибирского радиогелиографа *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 99–103. DOI: [10.12737/szf-74202110](https://doi.org/10.12737/szf-74202110).