

# Компенсация задержек и остановка интерференционных лепестков на Сибирском радигелиографе

С. В. Лесовой

8 мая 2018 г.

# 1 Компенсация геометрических задержек.

Геометрические задержки это разные времена прихода плоского волнового фронта на разные антенны радиоинтерферометра. Традиционно для многоэлементного радиоинтерферометра задержки рассчитываются относительно выбранного фазового центра  $O$ . На рисунке 1 показано формирование задержек в многоэлементном линейном интерферометре. Компенсация задержек производится в тракте каждой антенны. Геометрическую задержку можно определить как  $\tau_g^k = \vec{b}^k \vec{s} / c$ , где  $k$  – номер антенны,  $\vec{b}^k$  – вектор базы (координаты антенны относительно фазового центра),  $\vec{s}$  – направление на источник излучения,  $c$  – скорость света. Однако, при вычислении функций взаимной когерентности пары антенн, имеют значение только разности задержек  $\tau_g^{kl} = (\vec{b}^k - \vec{b}^l) \vec{s} / c$ . В принципе можно компенсировать такие разности для каждой пары антенн, но это требует более сложной схемы приемного тракта чем при компенсации задержки на каждой антенне. В начале рассмотрим компенсацию  $\tau_g^k$ , ниже будут рассмотрены особенности компенсации  $\tau_g^{kl}$ .

Задержка эквивалентна линейному наклону фаз в спектре сигнала. Поэтому компенсация задержки, фактически это компенсация соответствующего фазового наклона. Рабочий диапазон частот Сибирского гелиографа 4-8 ГГц. В настоящее время нет технической возможности компенсировать фазовый наклон на таких частотах. Поэтому компенсация производится на промежуточных частотах, что влечет за собой появление бегущей интерференционной картины (интерференционных лепестков). Остановка интерференционных лепестков производится тоже на промежуточных частотах, путем внесения переменной во времени фазы в сигнал каждой антенны. Фактически фаза вносится в сигналы вторых гетеродинов  $LO_2$ , представляющих собой управляемые цифровые генераторы, объединенные сигналом тактовой частоты. Второе преобразование частоты необходимо для понижения требований к линиям передачи данных от цифровых приемников к коррелятору. Смесители с подавлением зеркального канала, используемые при первом преобразовании частоты имеют полосу промежуточных частот в диапазоне 10-50 МГц. Поэтому первая промежуточная частота выбирается равной, 22 МГц. При полосе частот сигнала в 10 МГц можно выбрать вторую промежуточную частоту равной, скажем, 6 МГц. Тогда весь полезный сигнал будет сосредоточен в полосе частот 1-11 МГц, что минимизирует требования к линии передачи данных. Постоянная составляющая отсекается для того, чтобы подавить влияние смещений нулевого уровня на входах АЦП. Одновременно с переносом частоты происходит формирование квадратурных сигналов и компенсация фазы, ответственной за бегущую интерференционную картину.

На рисунке 2 и в таблице ?? показаны изменения фазовых характеристик сигнала в трактах двух различных антенн Сибирского гелиографа. Ри-

сунок 2 а) соответствует появлению задержек в момент достижения волновым фронтом антенн  $k$  и  $l$ . Для того, чтобы избежать потерь при вычислении взаимной когерентности разность фаз в полосе частот  $\Delta\omega$  между сигналами от различных антенн должна быть минимизирована. При переносе частоты вниз, кроме наклона фазы появляется постоянное смещение  $\omega_{lo1}\tau_g^k$  (рисунок 2 б), речь о котором пойдет ниже. Задержка вносится в тракт антенны на промежуточной частоте  $\omega_{if1}$ . Рисунок 2 с) показывает результат компенсации задержки. Отметим, что из-за невозможности внесения отрицательных задержек, в тракт вносятся дополнения задержек до постоянной  $\tau_0$ , превышающей максимально возможную задержку для данной антенной решетки. Штриховыми линиями показан наклон фаз соответствующий идеальной компенсации задержек, сплошными – реальный наклон фаз за счет конечной точности  $\tau_0 - \tau_i$ . Отметим, что постоянное смещение фазы  $\omega_{lo1}\tau_g^k$ , возникшее при переносе частоты, не компенсируется задержкой  $\tau_0 - \tau_i$ , меняющей только наклон фазы. Изменение во времени  $\omega_{lo1}\tau_g^k$  и есть причина бегущей интерференционной картины. После второго переноса частоты вниз (рисунок 2 д)), появляется добавка в выражении для постоянного фазового смещения в виде  $\omega_{lo2}(\tau_0 + \delta\tau_g^k)$ , которая должна быть учтена при остановке интерференционных лепестков. Компенсация постоянного смещения фазы производится путем соответствующего изменения фаз вторых гетеродинов  $LO2$ . Наконец, рисунок 2 е) показывает фазовые характеристики после компенсаций наклона фазы (задержки) и постоянного смещения фазы.

Оценим потери и уровень паразитных сигналов возникающих за счет неидеальной компенсации переменной во времени геометрической задержки. Выходной сигнал комплексного коррелятора, вычисляющего взаимную когерентность сигналов от пары антенн в полосе частот  $\Delta\omega$  за время  $\Delta\tau$ , зависит от разности фаз  $Z_k$  и  $Z_l$ . Можно записать

$$\langle\langle Z_k Z_l^* \rangle\rangle_\tau \sim \langle\langle \cos(\omega_{if2}(\delta\tau_g^k - \delta\tau_g^l) + \omega_{lo2}(\delta\tau_g^k - \delta\tau_g^l) + \omega_{lo1}(\tau_g^k - \tau_g^l)) \rangle\rangle_\tau \quad (1)$$

Следуя [2] можно оценить влияние неточностей компенсации фазового наклона  $\omega_{if2}(\delta\tau_g^k - \delta\tau_g^l)$ . Шаг изменения задержки  $\tau_s$  Сибирского радиогелиографа равен 1 нс в то время как максимальная задержка достигает 2 мкс. Так как распределение плотности вероятности ошибки квантования близко к равномерному для величины намного превышающей шаг квантования, то распределение плотности вероятности для разности ошибок  $\Delta\tau_g^{kl} = \delta\tau_g^k - \delta\tau_g^l$  будет вида  $\rho(\Delta\tau^{kl}) = (1 - \Delta\tau^{kl}/\tau_s)/\tau_s$ . Для полосы частот 10 МГц среднее квадратичное отклонение фазы буде меньше  $1^\circ$ . Поэтому потерями при вычислении взаимной корреляции можно пренебречь. Однако нельзя упускать из виду тот факт, что фазовая ошибка приводит к сдвигу диаграммы направленности двухэлементного интерферометра на угол зависящий от величины проекции

Таблица 1: Соотношения, показывающие фазы сигналов в различных частях приемного тракта.

к	л
a) $\omega_{rf}t - \omega_{rf}\tau_g^k$	$\omega_{rf}t - \omega_{rf}\tau_g^l$
b) $\omega_{if1}t - (\omega_{if1} + \omega_{lo1})\tau_g^k$	$\omega_{if1}t - (\omega_{if1} + \omega_{lo1})\tau_g^l$
$\omega_{if1}t - \omega_{if1}(\tau_0 - \tau_i^k + \tau_g^k) - \omega_{lo1}\tau_g^k$	$\omega_{if1}t - \omega_{if1}(\tau_0 - \tau_i^l + \tau_g^l) - \omega_{lo1}\tau_g^l$
c) $\omega_{if1}t - \omega_{if1}(\tau_0 + \delta\tau_g^k) - \omega_{lo1}\tau_g^k$	$\omega_{if1}t - \omega_{if1}(\tau_0 + \delta\tau_g^l) - \omega_{lo1}\tau_g^l$
$\omega_{if2}t - (\omega_{if2} + \omega_{lo2})(\tau_0 + \delta\tau_g^k) - \omega_{lo1}\tau_g^k$	$\omega_{if2}t - (\omega_{if2} + \omega_{lo2})(\tau_0 + \delta\tau_g^l) - \omega_{lo1}\tau_g^l$
d) $\omega_{if2}t - \omega_{if2}(\tau_0 + \delta\tau_g^k) - \omega_{lo2}(\tau_0 + \delta\tau_g^k) - \omega_{lo1}\tau_g^k$	$\omega_{if2}t - \omega_{if2}(\tau_0 + \delta\tau_g^l) - \omega_{lo2}(\tau_0 + \delta\tau_g^l) - \omega_{lo1}\tau_g^l$
e) $-\omega_{if2}\delta\tau_g^k - \Delta(\omega_{lo2}\delta\tau_g^k - \omega_{lo1}\tau_g^k)$	$-\omega_{if2}\delta\tau_g^l - \Delta(\omega_{lo2}\delta\tau_g^l - \omega_{lo1}\tau_g^l)$

его базы  $\Delta\theta = c\Delta\tau_g^{kl}/(|\vec{b}^k - \vec{b}^l| \sin\theta)$ . Солнечные интерферометры характеризуются наличием малых баз, для которых угловые отклонения, вызванные фазовой ошибкой, сравнимы с шириной диаграммы направленности одиночной антенны. Соответственно, измеренная взаимная корреляция будет существенно меняться для малых баз, в то время как для больших баз такими изменениями можно пренебречь. Обычно для солнечных радиоинтерферометров ширина диаграммы направленности одиночной антенны равна  $1.5 - 3.0^\circ$ . Угловое отклонение для минимальной базы Сибирского гелиографа 4.9 м  $\Delta\theta = 3.5^\circ$  в момент кульминации ( $\theta = \pi/2$ ). Следовательно для малых баз шаг изменения задержки 1 нс неприемлем.

Напомним, что компенсация задержки в цифровых приемниках Сибирского радиогелиографа реализуется двумя путями. Грубая задержка определяется частотой оцифровки и ее шаг равен 10 нс. Точная задержка реализуется путем соответствующего выбора фазовой характеристики цифрового фильтра, определяющего полосу частот принятого сигнала. Шаг точной задержки ограничен лишь ресурсом логических схем. Практика показывает, что при шаге точной задержке равном 0.1 нс, искажения взаимной корреляции малых баз становятся приемлемыми.

Диапазон изменения задержек определяет требования к цифровым линиям задержки. Кроме переменных во времени геометрических задержек существуют постоянные задержки, вызванные различными длинами оптических кабелей. Линия задержки должна обеспечивать диапазон задержек  $\max(\tau_g) + \max(\tau_f) - \min(\tau_f)$ , где  $\tau_f$  - задержка в оптическом кабеле. Для оптических кабелей длиной около км, разница геометрических длин может достигать нескольких метров. При скорости распространения света в оптоволокне, равной  $210^{10}$  см/с, разница задержек равна десяткам нс. В то время как для самой короткой из антенных баз ССРТ геометрическая задержка в течение

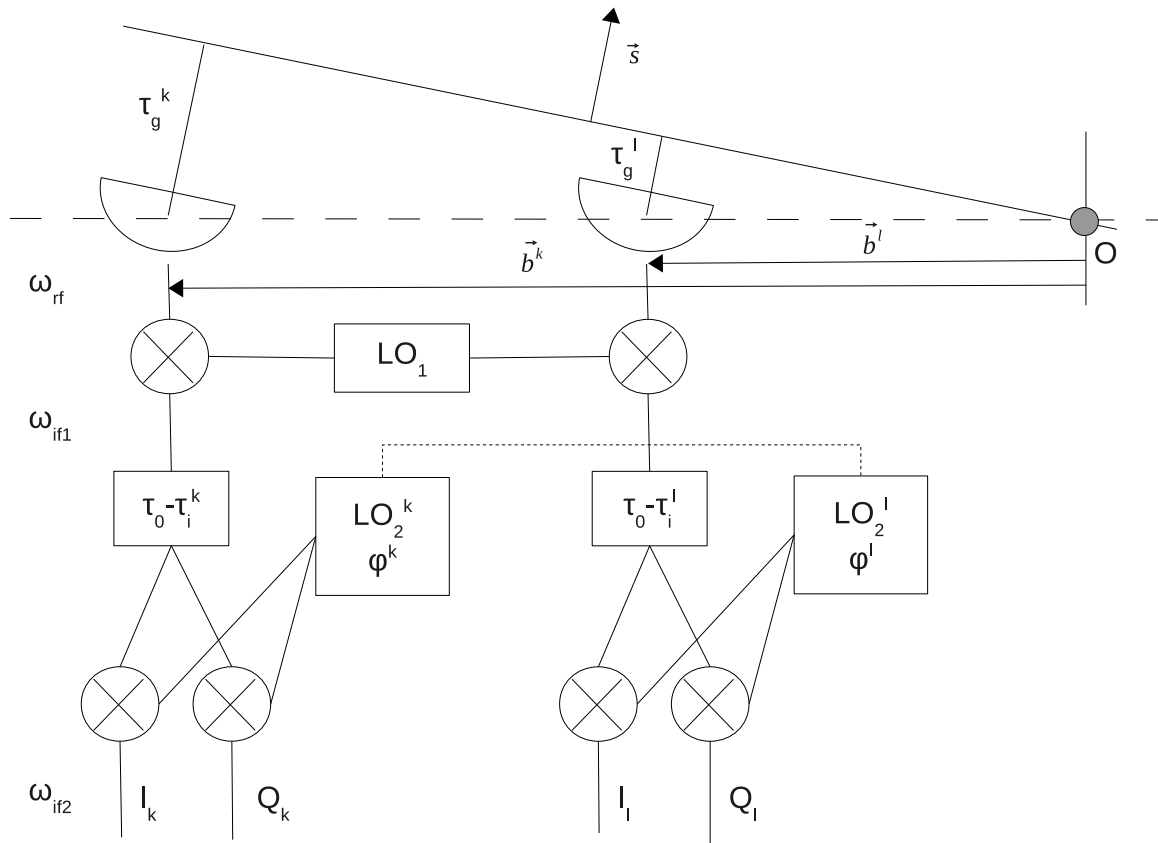


Рис. 1: Геометрические задержки, возникающие на антеннах  $k, l$  радиогелиографа. В точке  $O$  находится фазовый центр антенной решетки. Компенсация задержек производится на первой промежуточной частоте  $\omega_{if1}$ . Остановка интерференционных лепестков производится путем управления фазой вторых гетеродинов.

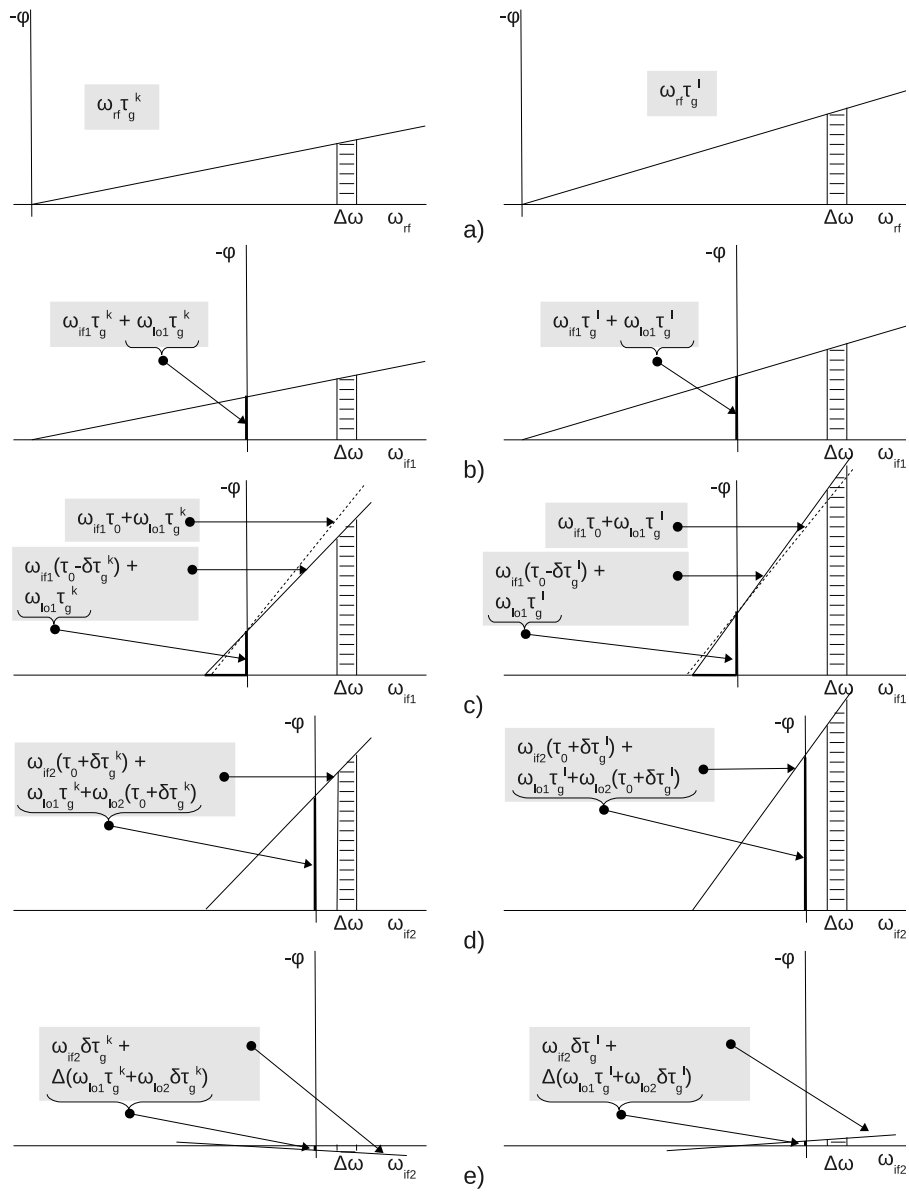


Рис. 2: Фазовые наклоны, вызванные геометрическими задержками, соответствующие соотношениям а-е. а – фазовые наклоны на рабочей частоте. б, с – на первой промежуточной частоте. д, е – на второй промежуточной частоте.

дня меняется в пределах 12 нс.

## References

Thompson A.R., Moran J.M., Swenson Jr., G.W.: 2001, *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 2nd Edition*.

Thompson A.R.: 2007, *FASR memo: Delay Tracking, Fringe Rotation, and Phase Switching in FASR*.