

Стабильность задержки в системах преобразования сигналов для РСДБ-радиотелескопов

© Е. В. Носов, А. С. Бердников, Д. А. Маршалов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Достижение пикосекундных точностей измерения задержки в РСДБ-наблюдениях требует контроля вариаций инструментальной задержки от скана к скану на уровне не хуже 1 пс. Нестабильность в электронных устройствах в значительной степени связана с вариациями температуры, поэтому для выполнения этих требований необходимо снижать чувствительность параметров оборудования к изменению температуры. Неустранимые вариации инструментальной задержки должны быть измерены и учтены в процессе обработки наблюдений.

В данной работе рассмотрены вопросы стабильности задержки в системах преобразования сигналов для РСДБ-радиотелескопов. Показаны основные источники нестабильности, приведены оценки соответствующих температурных коэффициентов задержки и способы их уменьшения. Также кратко описаны инженерные решения, позволяющие измерять внутренние вариации задержки в разработанной в ИПА РАН многофункциональной системе преобразования сигналов.

Ключевые слова: VGOS, РСДБ, система преобразования сигналов, стабильность задержки, температурный коэффициент задержки.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.49.52-59>

Введение

Одним из важных требований, предъявляемых к сигнальному тракту РСДБ-радиотелескопа, является стабильность инструментальной задержки на интервале времени, соответствующем сеансу наблюдений (часы). Для достижения точности измерений на уровне 1 мм, декларируемой в проекте глобальной РСДБ-сети нового поколения VGOS (VLBI Global Observing System), вариации инструментальной задержки должны поддерживаться или, по крайней мере, измеряться на уровне не хуже 1 пс [1]. Это требование, в частности, относится и к системе преобразования сигналов (СПС), являющейся частью сигнального тракта радиотелескопа. Современные СПС строятся на основе цифровой техники, в которой при правильном проектировании непреднамеренные вариации задержки сигнала возможны только в аналоговой части системы, расположенной до аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а также в цепях формирования и распределения тактового сигнала АЦП. Стабильность указанных цепей влияет на общие вариации инструментальной задержки радиотелескопа и является одним из критериев качества при разработке СПС.

Поскольку нестабильность задержки в электронных устройствах в значительной степени связана с вариациями температуры, то очевидным способом повысить стабильность оборудования является его термостабилизация.

Однако это может быть затруднительно, когда СПС устанавливается в ограниченном пространстве фокальной кабины радиотелескопа, как, например, в случае установки широкополосной СПС (ШСПС), используемой в данный момент на радиотелескопах РТ-13 [2]. Поэтому предпочтительнее снижать чувствительность СПС к вариациям температуры уже на стадии их разработки. Для этого разработчику СПС необходимо знать значения температурных коэффициентов задержки (ТКЗ) для тактовых цепей и входного каскада АЦП, что даст возможность определить наиболее чувствительные к воздействию температуры узлы и их оптимизировать.

В данной работе представлены результаты исследования ТКЗ составных частей цифровых СПС, полученные путем непосредственных измерений в ИПА РАН и анализа документации, предоставляемой производителями соответствующих электронных компонентов. Полученные данные были использованы при разработке многофункциональной СПС (МСПС), предназначенной для оснащения радиотелескопов РСДБ-сети «Квазар-КВО» [3], что позволило существенно снизить чувствительность задержки в МСПС к вариациям температуры по сравнению с ШСПС.

Температурный коэффициент задержки входных каскадов АЦП

На вариацию задержки регистрируемого сигнала в СПС влияет как входной аналоговый каскад перед АЦП, так и схема формирования и распределения тактового сигнала (рис. 1). Входной каскад служит для подготовки сигнала к оцифровке и может содержать: фильтр для ограничения спектра сигнала одной заданной зоной Найквиста, аттенюатор и усилитель для установки необходимого уровня входного сигнала, симметрирующий трансформатор («балун») для преобразования униполярного сигнала на входе в дифференциальный, что требуется для большинства высокоскоростных АЦП.

Рассмотрим вклад в ТКЗ, вносимый типичными элементами, используемыми в цепях СПС.

Аттенюаторы имеют крайне малую групповую задержку (десятки пикосекунд) и не способны значительно повлиять на общий ТКЗ. Например, цифровой аттенюатор, используемый в МСПС, имеет ТКЗ порядка 10 фс/К.

Симметрирующие трансформаторы необходимого частотного диапазона (1–2 ГГц) имеют групповую задержку от десятков до сотен пикосекунд, поэтому их вклад в ТКЗ СПС будет также незначительным.

Широкополосные фильтры для данного диапазона частот обычно имеют ТКЗ менее 1 пс/К. Например, используемый в ШСПС фильтр, выполненный по технологии низкотемпературной спекаемой керамики, имеет ТКЗ менее 100 фс/К в большей части полосы пропускания и около 200 фс/К в районе частоты среза.

Таким образом, оценка ТКЗ входного каскада АЦП дает величину существенно меньше 1 пс/К, что подтверждается измерениями. Так, для входных каскадов ШСПС ТКЗ не превышает 0.2 пс/К, а в МСПС ТКЗ лежит в пределах пс/К, что находится на уровне погрешности применяемого метода измерений. Следовательно, ТКЗ входных каскадов АЦП в ШСПС и МСПС не является определяющим.

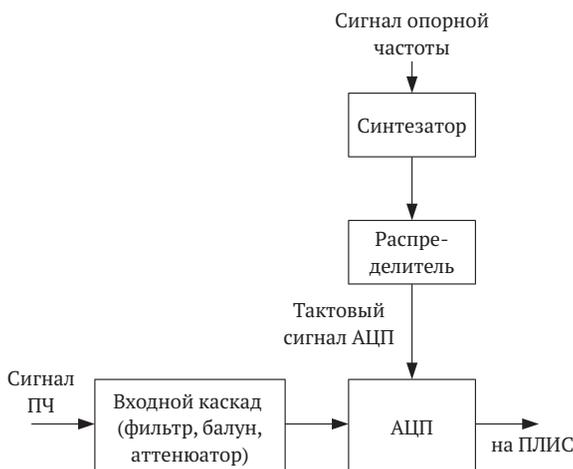


Рис. 1. Основные источники нестабильности задержки в СПС

Температурный коэффициент задержки тактовых цепей АЦП

Кроме вариаций во входном каскаде АЦП на задержку регистрируемого сигнала также влияют и вариации фазы тактового сигнала АЦП. Изменение времени прихода фронта тактового сигнала сдвигает время взятия отсчетов, что эквивалентно сдвигу входного сигнала на ту же величину, но в противоположном направлении. То есть увеличение задержки тактового сигнала на 1 пс приводит к уменьшению инструментальной задержки на 1 пс.

Тактовый сигнал АЦП обычно генерируется в СПС с помощью синтезатора частот из сигнала опорной частоты, получаемого от системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа. В многоканальных системах, таких как ШСПС и МСПС, сигнал тактовой частоты поступает на все АЦП каждого канала, что реализуется с помощью специализированных распределителей сигналов. И синтезаторы частот, и распределители, а также соединяющие их линии передачи имеют ТКЗ, который может влиять на общую инструментальную задержку. Оценим указанные величины.

Синтезатор частот для СПС обычно строится на основе петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Производители микросхем ФАПЧ не предоставляют информацию о стабильности фазы выходного сигнала от температуры. Отчасти это объясняется зависимостью данного параметра от заданных настроек микросхемы ФАПЧ и внешних факторов, например, скорости нарастания опорного сигнала на входе устройства. Опыт разработки синтезаторов частот инженерами ИПА РАН показывает, что ТКЗ синтезаторов на основе ФАПЧ может достигать нескольких пикосекунд на Кельвин. Выполненные измерения ТКЗ синтезатора в ШСПС показали значение в 1.2 пс/К, а в МСПС этот показатель был снижен до 0.2 пс/К.

Специализированные микросхемы распределителей тактовых сигналов дают простой способ синхронизировать все каналы преобразования в СПС. На рынке микроэлектроники представлено множество таких распределе-

лей, однако лишь для некоторых в документации представлен ТКЗ. Табл. 1, в которой приведены примеры доступных на рынке распределителей, демонстрирует большой разброс ТКЗ от значительных 2800 фс/К до пренебрежимых 35 фс/К. Поэтому при разработке СПС требуется тщательный выбор микросхем распределителей в соответствии с требованиями по стабильности. Кроме того, приводимые производителями значения ТКЗ в реальных условиях работы могут увеличиваться при уменьшении скорости нарастания фронта входного сигнала.

Таблица 1

ТКЗ распределителей тактовых сигналов с предельной частотой работы более 1 ГГц

Модель	Температурный коэффициент задержки, фс/К
AD9508	2800
ADCLK854	2000
MAX9312	500
LTC6953	350
SY89112U	150
SY58034U	65
ADCLK954	50
NB7L1008M	35

Задержка в линиях передачи на печатной плате также зависит от температуры. Время распространения сигнала в полосковой линии может быть оценено как [4]

$$T_{pd} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c}, \quad (1)$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала печатной платы; c — скорость света в вакууме. Одним из наиболее популярных материалов для печатных плат является FR4, имеющий ϵ_r около 4.5 и температурный коэффициент ϵ_r примерно 400 ppm/K (миллионных частей на Кельвин) [5]. Из (1) легко найти, что для линии передачи длиной 40 см, примерно соответствующей суммарной длине линий от входа опорной частоты до тактового входа АЦП в ШСПС, ТКЗ составит примерно 0.6 пс/К. Это заметная величина по сравнению с рассмотренными до этого источниками нестабильности, поэтому целесообразно уменьшить ее влияние.

Для этого необходимо использовать более совершенные материалы для производства печатных плат. Например, материал RO4350B, предназначенный для высокочастотных применений, имеет $\epsilon_r = 3.66$ и температурный коэффициент ϵ_r лишь 50 ppm/K. Линия передачи такой же длины (40 см), выполненная на RO4350B, будет иметь ТКЗ около 0.06 пс/К, то есть на порядок лучше, чем для FR4. Таким образом, использование RO4350B (или другого материала с хорошей стабильностью) позволяет сделать практически незаметным влияние платы на ТКЗ устройства.

В печатных платах МСПС материал RO4350B используется только для слоев, по которым ведутся тактовые и высокоскоростные линии, а также входные аналоговые сигналы на АЦП. Остальные слои плат выполнены на FR4, что позволяет уменьшить стоимость изготовления. Отметим, что для микрополосковой линии, располагающейся на внешнем слое печатной платы, материал диэлектрика будет меньше влиять на скорость распространения сигнала, и ТКЗ будет лучше, чем для полосковой линии, выполняемой во внутренних слоях платы.

Кроме печатных проводников для передачи сигналов в СПС могут применяться и переключки из коаксиального кабеля. Длинные коаксиальные кабели в азимутальной и угломестной петлях антенны способны значительно влиять на стабильность задержки из-за температурных изменений и механических воздействий. Однако в СПС длина переключек, как правило, не превышает 10–20 см. Даже при использовании кабелей с диэлектриком ПТФЭ (полимер тетрафторэтилена), обладающих эффектом так называемого температурного колена [6], нестабильности задержки будут пренебрежимо малы. Например, кабель марки SM141FER длиной 15 см при комнатной температуре имеет ТКЗ порядка 30 фс/К.

Наконец, нестабильность в задержку сигнала может вносить сама микросхема АЦП. К сожалению, на данный момент авторы не располагают надежными данными о температурной стабильности высокоскоростных АЦП. Опыт работы с ШСПС показывает, что ТКЗ АЦП не превышает величину 1 пс/К. Стабильность АЦП в МСПС будет измерена в начале 2020 г. с помощью встроенной калибровочной петли, о которой будет сказано далее.

Температурные коэффициенты ШСПС и МСПС

Основываясь на представленных выше данных, можно оценить ТКЗ для тактовых цепей в ШСПС и МСПС (табл. 2). Для распределителей тактового сигнала, используемых в ШСПС, данные о ТКЗ отсутствуют, поэтому для них использовано примерное значение 1 пс/К, основанное на параметрах близких аналогов. Учитывая, что в ШСПС сигнал тактовой частоты АЦП проходит через два распределителя, в табл. 2 использовано удвоенное значение ТКЗ 2 пс/К. К сожалению, информация по ТКЗ АЦП обеих систем также отсутствует, но условно будем считать, что они положительны.

Таблица 2

Оценка температурного коэффициента тактовых цепей ШСПС и МСПС

Источник нестабильности	ШСПС	МСПС
Синтезатор частот	1.2 пс/К	0.2 пс/К
Распределитель	2 пс/К	0.05 пс/К
Линии в печатной плате	0.6 пс/К	0.06 пс/К
АЦП	—	—
Итого	>3.8 пс/К	>0.31 пс/К

Так как влияние сигнального тракта на общий ТКЗ мало, то в первом приближении его можно не учитывать. Тогда данные в последней строчке табл. 2 должны примерно соответствовать общему ТКЗ систем с обратным знаком. Непосредственные измерения ТКЗ для ШСПС показывают близкое к оценке значение -4.5 пс/К. Как видно из таблицы, ТКЗ всех известных источников нестабильности в МСПС уменьшены в несколько раз по сравнению с ШСПС, т. е. задержка в МСПС будет значительно стабильнее. Реальные измерения ТКЗ МСПС будут выполнены в начале 2020 г., а для облегчения таких измерений в МСПС предусмотрены специальные средства.

Измерение вариаций задержки в МСПС

АЦП, используемый в каналах МСПС, имеет внутри себя четыре отдельных ядра, требующих калибровки для согласования между собой коэффициентов усиления, сдвига постоянной составляющей и задержки тактового сигнала. Для определения калибровочных параметров удобно использовать гармонический сигнал, подаваемый на один из доступных входов микросхемы. Калибровочный сигнал распределяется на все каналы МСПС и измеряется с помощью модуля выделения сигнала фазовой калибровки [7].

Получаемая в результате информация об амплитуде и фазе сигнала используется для калибровки ядер АЦП, но она же может использоваться и для контроля вариаций задержки сигнала. Это позволяет практически без усложнения устройства реализовать систему измерения вариаций задержки в отдельных узлах МСПС, что дает возможность контролировать стабильность и разделять внутренние вариации МСПС от вариаций входного сигнала. Принцип работы соответствующей схемы поясняется на рис. 2.

В качестве калибровочного сигнала может использоваться сигнал 100 МГц от входного распределителя или сигнал 256 МГц от синтезатора частот. Сигнал поступает на АЦП в каналах МСПС через микросхему распределителя, имеющую два переключаемых входа и расположенную вблизи распределителя тактовой частоты АЦП (2048 МГц). Так как распределители идентичны и располагаются рядом, они будут иметь одинаковые колебания температуры и вариации задержки. Вариации задержки в печатных проводниках также будут близки, так как линии калибровочного и тактового сигналов выровнены по длине.

Выраженная в единицах времени фаза измеряемого сигнала, а точнее ее изменения во времени, будут показывать разницу вариаций задержек между сигнальным и тактовым входами АЦП. В случае использования сигнала 256 МГц эта разница может быть записана как:

$$\Delta t_1 = \Delta t_{in} + \Delta t_{synt} + \Delta t_{dist} + \Delta t_{PCB} - \Delta t_{clk},$$

где Δt_{in} — вариации задержки во входном распределителе; Δt_{synt} — вариации задержки в синтезаторе частот; Δt_{clk} — общие вариации тактового сигнала АЦП, включая нестабильность Δt_{ADC} в самом АЦП, имеют вид:

$$\Delta t_{clk} = \Delta t_{in} + \Delta t_{synt} + \Delta t_{dist} + \Delta t_{PCB} - \Delta t_{ADC}.$$

Таким образом, измеряемая величина Δt_1 напрямую показывает вариации задержки в АЦП, так как все остальные источники нестабильности дают одинаковый вклад и в калибровочный, и в тактовый сигнал:

$$\Delta t_1 = \Delta t_{ADC}$$

Аналогично для калибровочного сигнала 100 МГц:

$$\Delta t_2 = \Delta t_{in} + \Delta t_{dist} + \Delta t_{PCB} - \Delta t_{clk}$$

В этом случае измеряемая величина Δt_2 показывает общую вариацию задержки в синтезаторе частот и АЦП:

$$\Delta t_2 = \Delta t_{synt} - t_{ADC}$$

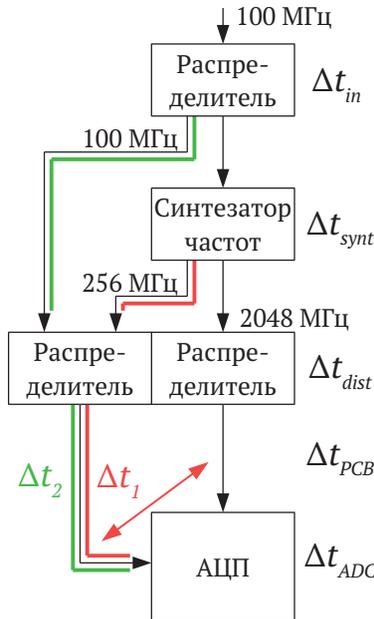


Рис. 2. Схема измерения вариаций внутренних задержек МСПС

Таким образом, периодические измерения Δt_1 и Δt_2 позволяют контролировать стабильность АЦП и синтезатора частот. По тому же принципу, добавив в схему еще один распределитель, можно измерить и вариации задержки Δt_{dist} и Δt_{PCB} . Однако большой необходимости в этом нет, так как ожидается, что ТКЗ распределителей и линий печатной платы будет пренебрежимо мал (менее 100 фс/К). Так как отношение сигнал/шум для калибровочного сигнала на входе АЦП велико, ожидаемая точность измерений должна быть существенно лучше 1 пс, что подтверждается моделированием, учитывающим эффекты квантования, дискретизации и джиттера.

Заключение

Системы преобразования сигналов для РСДБ могут иметь температурный коэффициент задержки на уровне нескольких пикосекунд на градус Кельвина, что является ощутимой величиной для перспективных РСДБ-сетей, таких как проект VGOS, и способно внести заметный вклад в вариации инструментальной задержки радиотелескопа. Несмотря на то, что вносимая СПС вариация задержки входит в показания системы фазовой калибровки радиотелескопа и может быть учтена при обработке наблюдений, предпочтительно поддер-

живать ее на малом уровне. Анализ источников нестабильности позволил уменьшить температурный коэффициент задержки МСПС в несколько раз по сравнению с ШСПС. Оставшиеся вариации измеряются встроенной в МСПС системой калибровки, что позволяет отделить нестабильности в МСПС от вариаций в других частях сигнального тракта.

Л и т е р а т у р а

1. *Petrachenko B., Niell A., Behrend D., Corey B., Bohm J., Charlot P., Collioud A., Gipson J., Haas R., Hobiger T., Koyama Y., MacMillan D., Nilsson T., Pany A., Tuccari G., Whitney A., Wresnik J.* Design Aspects of the VLBI2010 System // Progress Report of the VLBI2010 Committee. — NASA Technical Memorandum. NASA/TM-2009-214180, 2009.

2. *Nosov E., Melnikov A., Marshalov D.* Operating Experience of Broadband Acquisition System on RT-13 Radio Telescopes // IVS 2016 General Meeting Proceedings. "New Horizons with VGOS" / ed. by D. Behrend K. D. Bayer, K. Armstrong — NASA/CP-2016-219016., 2016. — P. 53–57.

3. *Nosov E., Ivanov D., Ipatov A., Mardyshev V., Marshalov D., Mikhailov A., Rakhimov I., Salnikov A., Vytnov A.* Extending of "Quasar" VLBI-network: VGOS-compatible radio telescope in Svetloe // IVS 2018 General Meeting Proceedings. / ed. by D. Behrend K.D. Bayer, K. Armstrong — NASA/CP-2019, 2019. — P. 12–16.

4. *Johnson H., Graham M.* High-speed Signal Propagation: Advanced Black Magic. — New York: Prentice Hall Professional, 2003. — 792 p.

5. *Coonrod J.* Understanding When To Use FR-4 Or High Frequency Laminates // Onboard Technology. — P. 25–30.

6. *Czuba K., Sikora D.* Temperature Stability of Coaxial Cables // Acta Physica Polonica A. — 2011. — Vol. 119, no. 4. — P. 553–557.

7. *Носов Е. В.* Реализация на ПЛИС контроля фазовой калибровки в перспективной широкополосной системе преобразования сигналов // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 499–503.

Delay Stability in Digital Backends of VLBI Radio Telescopes

E. V. Nosov, A. S. Berdnikov, D. A. Marshalov

Achieving picoseconds delay accuracy in VLBI observations requires controlling the variations of instrumental delay on the level of 1 picosecond or better in each scan. Instability in electronic devices is significantly related to temperature variations, therefore it is necessary to reduce temperature sensitivity of the equipment and stabilize the temperature where possible. The remaining variations of instrumental delay should be measured and taken into account during the processing. The paper overviews instability sources in VLBI digital backends and provides the corresponding delay temperature coefficients, as well as the ways to reduce them. It also describes embedded calibration system for measuring internal delay variations in the Multifunctional Digital Backend developed in IAA RAS.

Keywords: delay stability, instrumental delay, VLBI, radio telescope, digital backend, Multifunctional Digital Backend, Broadband Acquisition System.