

## Измерители фаз для сигналов L- и S-диапазонов

*Григорян Р. М., Поляков С. А., Гуляев И. Б.*

*Рассмотрены способы измерения сдвигов фаз для сигналов L- и S-диапазонов. Приводится обоснование разработки автоматического измерителя фаз (ИФ) для таких сигналов. Описывается экспериментальное исследование выходных характеристик фазового детектора AD8302 и корректировка расчётных формул на основе полученных данных. Отличительной особенностью разработанных устройств является наличие двух линий задержек в сигнальных трактах, что позволяет получать значения сдвигов фаз с ошибкой, не превосходящей  $\pm 5^\circ$  в диапазоне  $0^\circ$ - $360^\circ$ .*

### **Введение**

Измерение разности фаз сигналов СВЧ диапазона является одним из этапов производства СВЧ модулей. На сегодняшний день самые распространённые способы измерения сдвигов фаз сигналов можно разделить на следующие три класса: с помощью механического фазовращателя, с использованием различных фазовых детекторов и методами цифровой обработки сигналов. Первый метод является самым точным, но при этом долгим и трудоёмким. Третий требует наличия дорогого оборудования (например, анализаторов цепей фирмы Agilent Technologies), что при необходимости иметь несколько таких измерителей приводит к большим материальным затратам. Измерение сдвигов фаз на основе фазовых детекторов является компромиссным решением между точностью и стоимостью. Отсутствие на рынке подобных устройств, позволяющих измерять сдвиг фаз с ошибкой измерения, не превышающей  $\pm 5^\circ$ , делает актуальной задачу разработки ИФ на основе фазового детектора.

### **Фазовый детектор, структурная схема измерителей фаз**

Основой разработанных ИФ является фазовый детектор AD8302 фирмы Analog Devices. AD8302 представляет собой ИС, измеряющую соотношение амплитуд и сдвиг фаз между двумя независимыми входными сигналами. ИС может применяться для сигналов вплоть до 2,5 ГГц в широком динамическом диапазоне. AD8302 совмещает в себе пару логарифмических усилителей и высокочастотный цифровой фазовый детектор, построенный по схеме исключяющего-ИЛИ, и выдаёт аналоговое напряжение, пропорциональное соотношению указанных выше величин (VMAG и VREF соответственно) [1,2]. При значении опорного напряжения 1,8 В номинальный наклон амплитудной характеристики составляет 30 мВ/дБ, фазовой характеристики – 10 мВ/град. Реальные выходные характеристики имеют более сложный вид и описываются дальше. Одной из сложностей при работе с данной ИС является неопределённость знака разности фаз, т. е. сдвигам фаз  $+90^\circ$  и  $-90^\circ$  будет соответствовать одно и то же значение VPHS. Второй сложностью является увеличение ошибки измерения при увеличении частоты входных сигналов и приближении к областям  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Как следует из [1], ошибка измерения в районе этих областей может достигать  $9^\circ$ . На частотах выше 1,5 ГГц выходные характеристики становятся нелинейными даже на значительном удалении от этих двух крайних точек, так что достоверные соотношения фаз можно получить только в диапазоне  $30^\circ$ - $120^\circ$ , что составляет 1/3 от номинального диапазона  $0^\circ$ - $180^\circ$ .

Для того, чтобы решить обозначенные выше проблемы, в каждый измерительный

тракт были введены независимые переключающиеся линии задержек, которые позволяют сдвигать разность фаз на постоянное значение (около 60°). Благодаря этому появляется возможность определить знак сдвига фаз и перейти из областей с низкой точностью в области с высокой точностью. Для сигналов L-диапазона AD8302 используется напрямую, для сигналов S-диапазона проводится предварительное понижение частоты до 800 МГц (рис. 1).

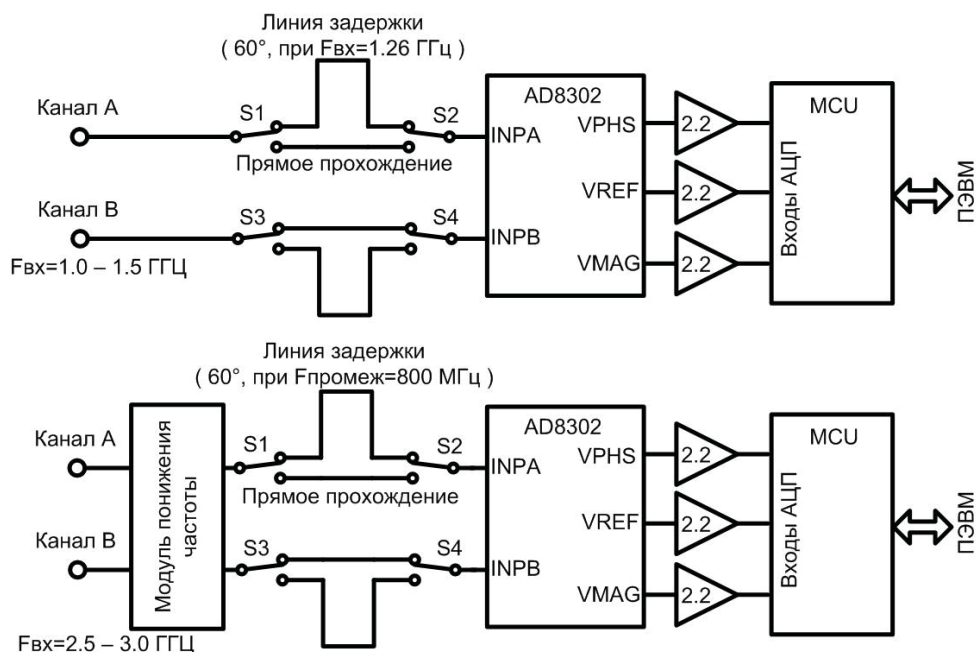


Рис. 1

Структурные схемы фазометров. Линии задержек позволяют определить знак сдвига фаз и увеличить точность измерений. Сигналы S-диапазона предварительно преобразуются до 800 МГц

Согласно описанию на ИС AD8302 разница фаз между сигналами на входах INPA и INPB определяется как

$$\Delta\Phi = \pm \frac{VREF - VPHS}{Kslope} = \pm \frac{1.8B - VPHS}{10^{мВ/градус}}, \quad (1)$$

где  $VREF$  – внутреннее опорное напряжение,  $Kslope$  – наклон фазовой характеристики,  $VPHS$  – напряжение, соответствующее сдвигу фаз.

Экспериментальное исследование AD8302 при помощи установки (рис. 2) показало, что  $VREF$  и  $Kslope$  отличаются от своих номинальных значений (рис. 3).

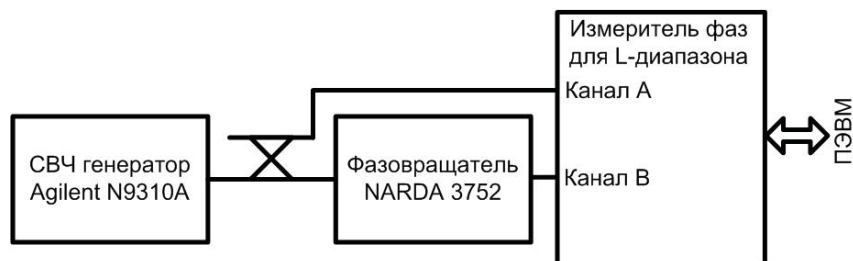


Рис. 2

Экспериментальная установка для определения реальных выходных характеристик AD8302

В данном случае был использован ИФ для L-диапазона, так как в нём не применяется преобразование частоты и, следовательно, не вносятся искажения во входные сигналы. Механический фазовращатель NARDA 3752 имеет ошибку установки сдвига фазы  $\pm 0,5^\circ$ , поэтому может служить эталоном. При помощи фазовращателя постепенно и дискретно увеличивался сдвиг фаз между каналами А и В измерителя фаз, при этом на каждом шаге измерялись  $V_{REF}$ ,  $V_{MAG}$  и  $V_{PHS}$ .  $V_{PHS}$  измерялось три раза для каждого из состояний переключаемых линий задержек, а именно: переключатели в прямом положении (кривая  $PHS$  на рис. 3), включена линия задержки в канале А (кривая  $PHS\_DEL1$  на рис. 3) и включена линия задержки в канале В (кривая  $PHS\_DEL2$  на рис. 3).

Прежде всего, было обнаружено, что  $V_{REF}$  для всех исследованных образцов ИС AD8302 имело значение в диапазоне 1,83-1,85 В, так что величины  $V_{MAG}$  и  $V_{PHS}$  предварительно нормировались к значению 1,8 В. Кривые  $PHS\_DEL1$  и  $PHS\_DEL2$  являются сдвинутыми копиями кривой  $PHS$ , значение сдвига определяется набегам фаз, вносимыми линиями задержек в каналах А и В (рис. 3).

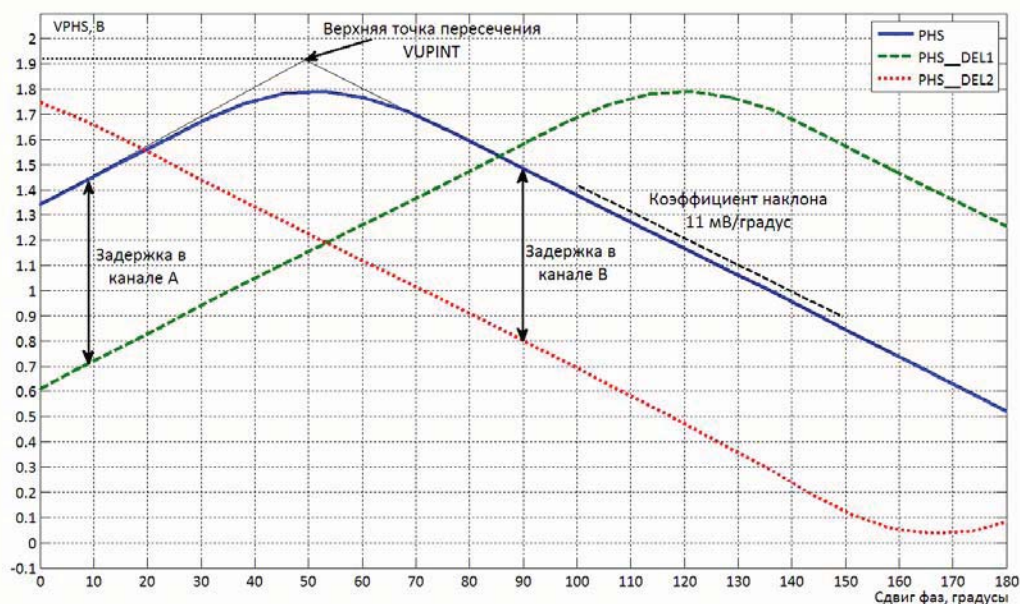


Рис. 3

Нормализованное значение  $V_{PHS}$  для трёх состояний линий задержек в измерительных трактах, уровни сигналов - 10 dBm, частота - 1,26 ГГц

Из рис. 3 видно, что для точного определения разности фаз формула (1) должна быть изменена:

$$\Delta\Phi = \pm \frac{V_{UPINT} - V_{PHS}}{K_{slope}} = \pm \frac{1.92B - V_{PHS}}{11 \text{ мВ/градус}}, \quad (2)$$

где  $V_{UPINT}$  – верхняя точка пересечения продолжения сторон характеристики  $V_{PHS}$ . Реальное значение  $K_{slope}$  было определено методом линейной регрессии и составило 11 мВ/градус. При помощи формулы (2) были определены величины набегов фаз (которые можно обозначить как  $del1$  и  $del2$ ), вносимых линиями задержек в сигнальных трактах. Введём обозначения:

$$\delta\Phi_1 = \frac{VUPINT - VPHS\_DEL1}{Kslope} = \frac{1.92B - VPHS\_DEL1}{11^{mB/градус}} \quad (3)$$

$$\delta\Phi_2 = \frac{VUPINT - VPHS\_DEL2}{Kslope} = \frac{1.92B - VPHS\_DEL2}{11^{mB/градус}} .$$

Как указано выше, для одного измерения разности фаз имеются три значения  $VPHS$ , соответствующих кривым  $PHS$ ,  $PHS\_DEL1$  и  $PHS\_DEL2$ , но искомое значение определяется только по одной из них. На рис. 4 схематично представлены эти кривые, а также обозначены особые точки. Заштрихованы области, в которых ошибка измерения сдвига фаз велика, а значит, использовать соответствующую кривую нельзя. В этом случае необходимо использовать другую кривую. Рассмотрим возможные варианты. Предположим, что искомый сдвиг фаз соответствует положению точки  $\Phi_1$ . На  $PHS$  эта точка лежит внутри диапазона 0,6-1,2 В, поэтому можно определить сдвиг фаз непосредственно по формуле (2). Знак сдвига определяется при помощи кривых  $PHS\_DEL1$  и  $PHS\_DEL2$ . В случае, когда на кривой  $PHS$  искомая точка лежит в диапазоне 0,6-1,4 В, для нахождения сдвига фаз применяются выражения:

$$\delta\Phi = \begin{cases} + \frac{VUPINT - VPHS}{Kslope}, & VPHS\_DEL1 \geq VPHS\_DEL2 \\ - \frac{VUPINT - VPHS}{Kslope}, & VPHS\_DEL1 < VPHS\_DEL2 . \end{cases} \quad (4)$$

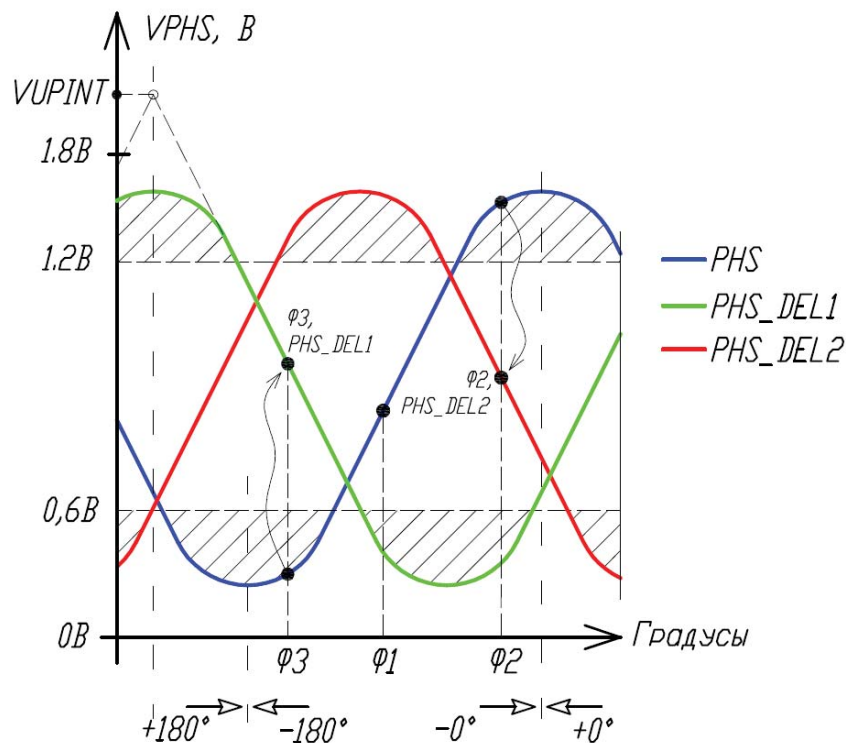


Рис. 4

Пояснение к алгоритму определения сдвига фазы

Рассмотрим точку  $\Phi_2$ . На  $PHS$  и  $PHS\_DEL1$  ей соответствуют значения, лежащие вне допустимого диапазона 0,6-1,2 В, и следовательно сдвиг фаз определяется по кривой  $PHS\_DEL2$ . В случае, когда на кривой  $PHS$  искомая точка лежит выше 1,4 В,

для нахождения сдвига фаз применяются следующие выражения:

$$\delta\Phi = \begin{cases} +\frac{VUPINT - VPHS\_DEL2}{Kslope} - del2, VPHS\_DEL1 \geq VPHS\_DEL2 \\ -\frac{VUPINT - VPHS\_DEL1}{Kslope} + del1, VPHS\_DEL1 < VPHS\_DEL2. \end{cases} \quad (5)$$

Выбор между кривыми  $PHS\_DEL1$  и  $PHS\_DEL2$  обусловлен тем, что чем меньше их значение, тем ближе оно к уровню 0,9, который согласно документации на ИС AD8302 соответствует минимальной ошибке измерения. При этом знак сдвига фаз получается из расчёта.

Аналогичные рассуждения можно построить, когда искомая точка на кривой  $PHS$  находится в нижней заштрихованной области, т. е. значение  $PHS$  меньше 0,6 В (точка Ф3 на рис. 6). В этом случае применяются следующие выражения:

$$\delta\Phi = \begin{cases} \begin{cases} -(180 - (\delta\Phi1 + del1 - 180)), \delta\Phi1 + del1 \geq 180, VPHS\_DEL1 \geq VPHS\_DEL2 \\ \delta\Phi1 + del1, \delta\Phi1 + del1 < 180 \end{cases} \\ \begin{cases} +(180 - (\delta\Phi2 + del2 - 180)), \delta\Phi2 + del2 \geq 180, VPHS\_DEL1 < VPHS\_DEL2 \\ -(\delta\Phi2 + del2), \delta\Phi1 + del1 < 180. \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

Формулы (4), (5) и (6) позволяют определять сдвиг фаз в диапазоне 0°-360°. Несмотря на то, что постоянные величины  $VUPINT$ ,  $Kslope$ ,  $del1$  и  $del2$  для каждого конкретного измерителя фаз можно аппроксимировать достаточно точно из семейства кривых, указанных на рис. 5, всё же можно заметить, что фазовая характеристика AD8302 является нелинейной даже в диапазоне 0,6-1,2 В, а это, в свою очередь, приводит к тому, что задержки  $del1$  и  $del2$  также являются непостоянными в том же самом диапазоне. Всё это приводит к негативному эффекту, который заключается в том, что, например, в диапазоне 0°-280° ошибка измерений ИФ не превышает 2°, затем происходит резкий скачок с последующим накоплением ошибки измерений вплоть до 10°, что является недопустимым для разрабатываемого ИФ. Для того, чтобы решить эту проблему, при помощи программы MATLAB  $VUPINT$ ,  $Kslope$ ,  $del1$  и  $del2$  выбираются близкими к значениям, полученным из графиков, при которых уменьшается точность измерений на каких-то определённых интервалах сдвигов фаз, но в целом ошибка измерений в диапазоне 0°-360° минимальна. Делается это следующим образом: с шагом 5,6° (для S-диапазона) при помощи установки (рис. 2) снимались показания с ИФ и заносились в ПЭВМ, затем задавались диапазоны вариаций величин  $VUPINT$ ,  $Kslope$ ,  $del1$  и  $del2$  (для  $VUPINT$ , например, это 1,85-1,95 В). Далее по формулам (4), (5) и (6) вычислялся сдвиг фаз для каждой комбинации, затем определялось среднеквадратичное отклонение от реального сдвига фаз. В итоге выбиралась комбинация  $VUPINT$ ,  $Kslope$ ,  $del1$  и  $del2$ , для которой среднеквадратичное отклонение было минимальным (рис. 5).

### Реализация измерителей фаз

Указанная выше методика измерений была реализована в виде двух ИФ для сигналов 1,0-1,5 ГГц и 2,5-3,0 ГГц соответственно. ИФ имеют одинаковую конструкцию, состоящую из аналоговой СВЧ и цифровой частей. Центральным элементом цифровой части является микроконтроллер PIC16F873A фирмы Microchip. Разработанные ИФ используют протокол RS-232 для обмена данными с ПЭВМ или другим цифровым устройством. ИФ имеют два режима работы: технологический и измерительный. В технологическом режиме на ПЭВМ передаются измеренные значения  $V_{MAG}$ ,  $V_{REF}$



и *VPHS* ИС AD8302, которые используются для калибровки конкретного экземпляра ИФ. Калибровочная информация записывается в энергонезависимую память PIC16F873A. В измерительном режиме на ПЭВМ передаются результаты измерений сдвигов фаз в виде числа от  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ .

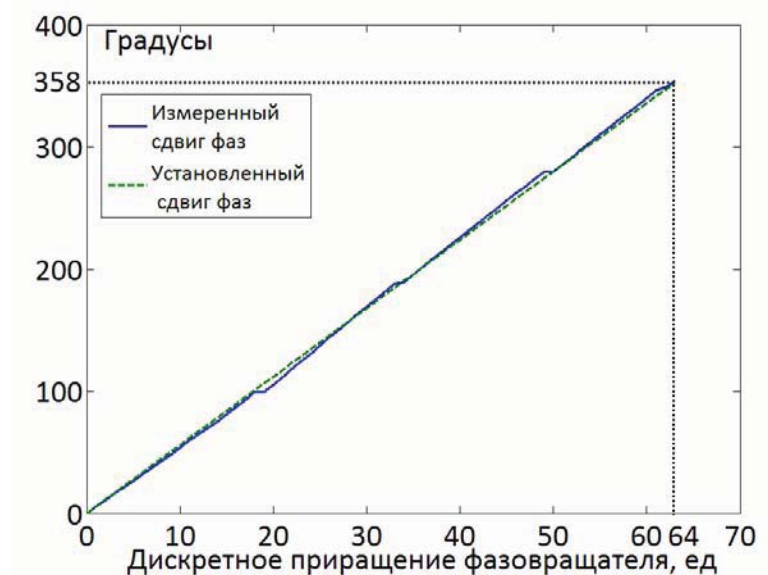


Рис. 5

Выходная характеристика ИФ S-диапазона

### Заключение

Несмотря на недостатки ИС AD8302, предложенная методика измерений и калибровки позволила создать измерители фаз для сигналов 1,0-1,5 ГГц и 2,5-3,0 ГГц, имеющих ошибку измерений не более  $\pm 5^\circ$  в диапазоне  $0^\circ$ - $360^\circ$ . Динамический диапазон у ИФ для L-диапазона составляет  $-40\dots-20$  дБм, у ИФ для S-диапазона –  $-10\dots+10$  дБм. Низкая себестоимость, компактность и автоматизация разработанных ИФ при сохранении высокой точности измерений позволяют заменить механические способы измерений сдвигов фаз без больших материальных затрат.

### Литература

1. LF-2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector, Analog Devices, Inc. 2002.
2. John Cowles, Barrie Gilbert. Accurate Gain/Phase Measurement at Radio Frequencies up to 2.5 GHz. – Analog Dialogue 35-05 (2001).