

# Анализ фазового шума высокочастотных приемопередатчиков

при использовании внешнего гетеродина

Программно-определяемые радиосистемы сегодня являются одной из ведущих тем в отрасли. За последнее время рабочие характеристики программно-определяемых радиосистем были значительно улучшены благодаря появлению высокочастотных (ВЧ) приемопередатчиков, представляющих собой комплексные решения, выполненные в виде монолитных микросхем. Семейство приемопередатчиков Analog Devices содержит микросхемы, которые можно использовать во многих радиосистемах, полностью управляемых программным обеспечением. Одна из областей применения этих устройств, которую еще предстоит изучить, — использование в оборудовании с требуемым низким фазовым шумом. В статье дана оценка фазового шума этих высокоинтегрированных высокочастотных микросхем при их работе с внешним источником опорной частоты.

Петер Дилос (Peter Delos)

Перевод: Михаил Русских  
tau68@rambler.ru

В результате измерения параметров приемопередатчика ADRV9009 компании Analog Devices при использовании внешнего гетеродина было установлено, что при использовании гетеродина с низким уровнем шума возможно значительное снижение фазового шума. В статье приведена архитектура приемопередатчика в аспекте влияния различных составляющих фазового шума. В результате ряда измерений остаточный или аддитивный фазовый шум был получен и изображен в виде графика в зависимости от частоты, запрограммированной на выходе ЦАП. Используя вклад этого шума наряду с фазовым шумом входных частот как гетеродина, так и источника опорной частоты, специалисты произвели оценку суммарного фазового шума на выходе передатчика. Далее эти оценки подверглись сравнению с результатами измерений.

## Введение

Фазовый шум является одним из критически важных показателей качества сигнала, свойственных радиосистемам. Уже на этапе выбора архитектуры радиосистемы проводится скрупулезная работа по обеспечению минимально требуемого фазового шума наиболее экономичным способом.

В результате измерения параметров приемопередатчика ADRV9009 было выявлено, что существует широкий диапазон возможных шумовых характеристик в зависимости от выбранной реализации. При использовании внутреннего гетеродина фазовый шум

определяется внутренним контуром фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и генератором, управляемым напряжением (ГУН), в интегральном исполнении. Внутренний гетеродин был спроектирован так, чтобы удовлетворить требования большинства коммуникационных систем. Для систем, в которых необходимо поддерживать наименьший уровень шума, в качестве внешнего гетеродина может использоваться источник с низким фазовым шумом, благодаря чему удается значительно уменьшить суммарный фазовый шум.

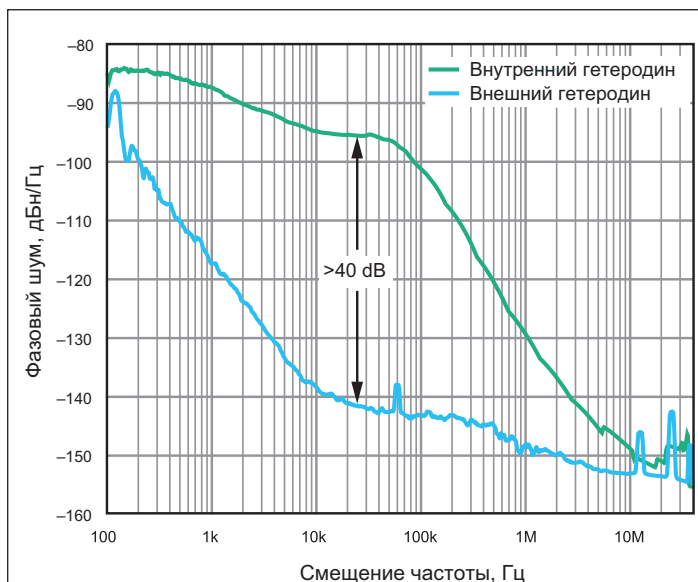
На рис. 1 показана возможность уменьшения фазового шума более чем на 40 дБ в диапазоне отстройки от несущей частоты приемопередатчика ADRV9009 10–100 кГц. Условия, при которых были выполнены эти измерения, следующие. Для измерения параметров внутреннего гетеродина его частота была установлена на 2,6 ГГц, а частота выходного сигнала ЦАП составила 8 МГц. Для измерений параметров внешнего гетеродина в качестве гетеродина использовался генератор сигналов SMA100B компании Rohde & Schwarz. В тракте гетеродина присутствует внутренний делитель частоты, поэтому для обеспечения частоты гетеродина 2,6 ГГц частота генератора была установлена на 5,2 ГГц. Измерения выполнялись с помощью анализатора фазового шума HA7402 компании Holzworth.

## Приемопередатчик ADRV9009

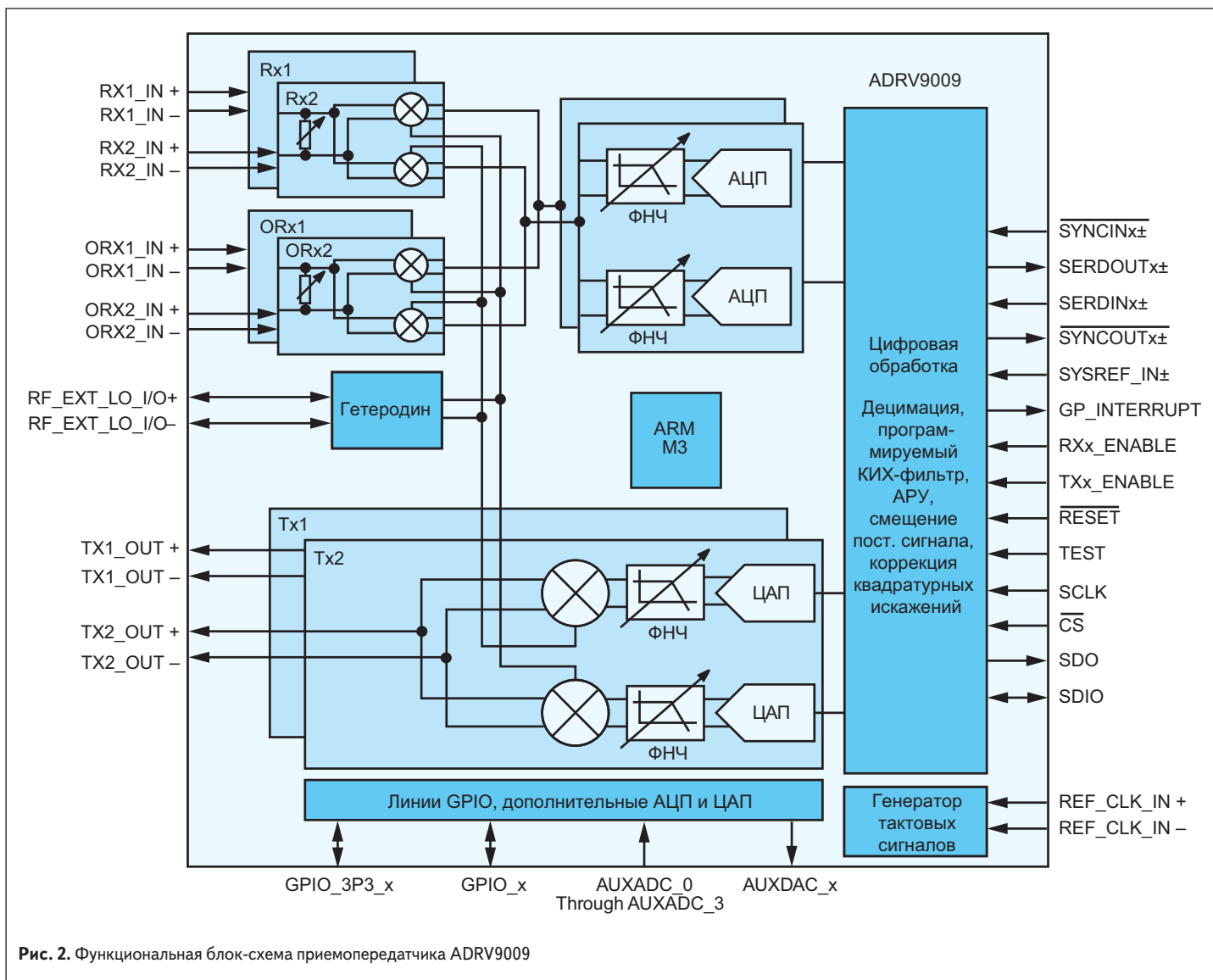
ADRV9009 — это новейшее устройство в семействе приемопередатчиков компании Analog Devices. Архитектура приемопередат-

чика показана на рис. 2. Такие приемопередатчики представляют собой двухканальные радиосистемы с возможностью передачи и приема, реализованные в виде монолитных микросхем с помощью архитектуры прямого преобразования [1]. Цифровая обработка сигналов включает коррекцию квадратурных искажений, удаление постоянной составляющей сигнала и алгоритмы компенсации утечки гетеродина, что позволяет достигнуть характеристик, которые возможны при архитектуре прямого преобразования. Приемопередатчик ADRV9009 имеет полноценный набор функциональных блоков для преобразования высокочастотных сигналов в цифровой код. Он может работать с входными частотами до 6 ГГц, а интерфейс JESD204B обеспечивает высокоскоростную передачу данных в процессоры на основе ПЛИС типа FPGA или специализированных микросхем (ASIC).

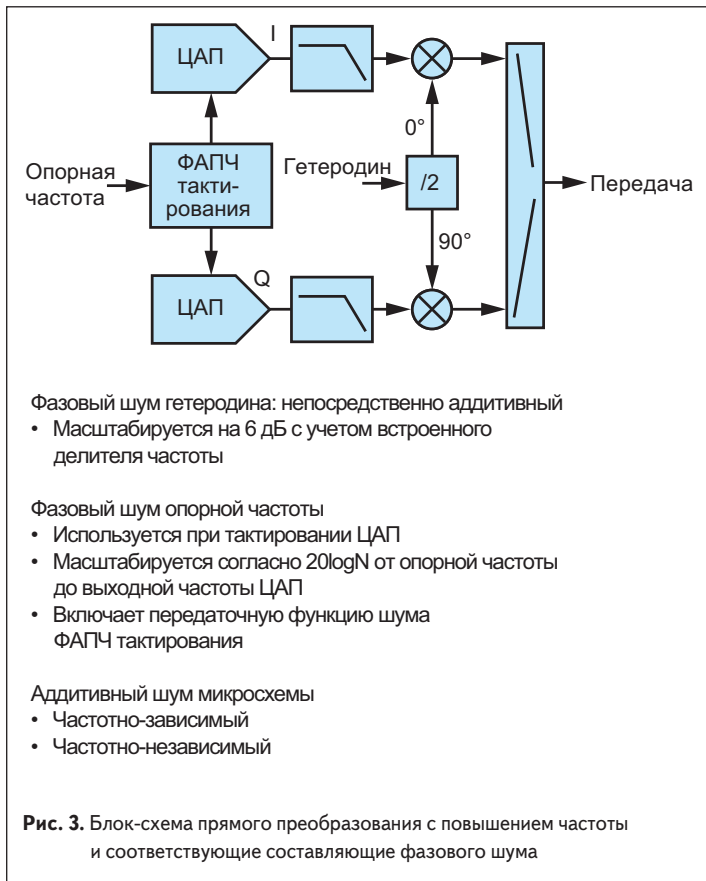
Радиосистема синхронизируется с входной опорной частотой. Несколько ФАПЧ синхронизируют фазу с опорным сигналом, в том числе для тактовых генераторов преобразователя, гетеродина и тактовых генераторов цифровой подсистемы. Также имеется возможность подключения внешнего гетеродина, который позволяет шунтировать ФАПЧ внутреннего гетеродина, тем самым исключив его из сигнальной цепи. В тракте гетеродина предусмотрен делитель частоты, стоящий между входом ФАПЧ или внешнего гетеродина и портами частотного смесителя. Он используется для генерации квадратурных сигналов гетеродина, необходимых для работы архитектуры прямого преобразования. Тактовые генераторы преобразователя и гетеродин непосредственно влияют на уровень фактического фазового шума, и о них будет упомянуто далее при оценке составляющих фазового шума.



**Рис. 1.** Результаты измерений фазового шума приемопередатчика ADRV9009. При использовании внутреннего гетеродина фазовый шум ограничивается ФАПЧ/ГУН в интегральном исполнении. При использовании внешнего гетеродина с низким фазовым шумом можно добиться значительного улучшения фазового шума



**Рис. 2.** Функциональная блок-схема приемопередатчика ADRV9009



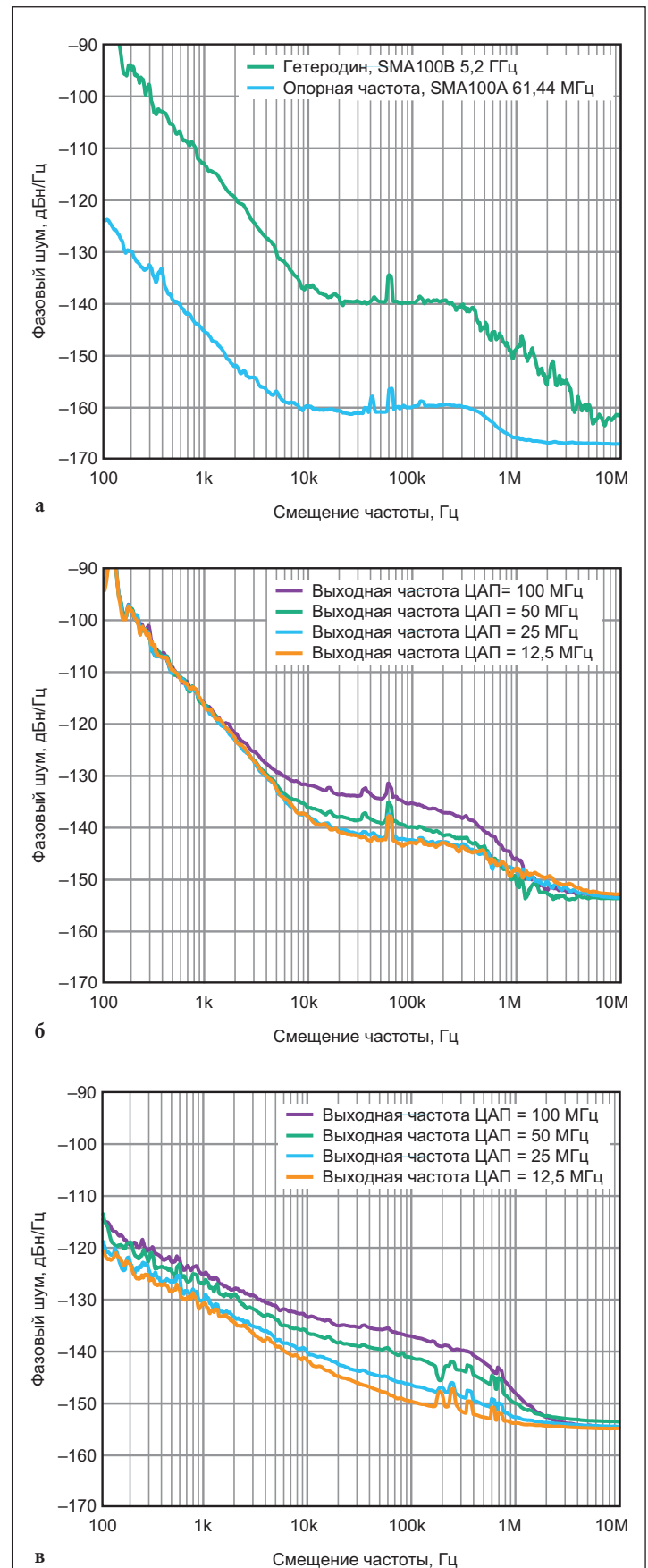
### Анализ составляющих фазового шума

На выходе тракта передачи фазовый шум имеет несколько составляющих. На рис. 3 показана упрощенная блок-схема архитектуры генератора сигнала прямого преобразования, там же обозначены основные источники фазового шума.

Прежде чем приступить к анализу фазового шума приемопередатчика, следует рассмотреть несколько фундаментальных принципов. В умножителе или делителе частоты фазовый шум масштабируется в соответствии с  $20\log N$ , где  $N$  — отношение входной частоты к выходной [2]. Этот принцип справедлив и в отношении генераторов прямого цифрового синтеза (DDS), где вносимый шум тактирования масштабируется с выходной частотой DDS в соответствии с  $20\log N$ . Второй момент, который следует учитывать, — передаточные функции фазового шума в системе ФАПЧ [3–7]. Входная частота, вводимая в систему ФАПЧ, будет масштабироваться до выходного сигнала как функция соотношения частот (аналогично множителю), но и будет проявляться эффект фильтра нижних частот в зависимости от ширины полосы пропускания контура и выбранного типа контурного фильтра.

Применяя эти принципы к приемопередатчику, можно подробнее изучить различные составляющие фазового шума. В приемопередатчик поступают две частоты — частота гетеродина и опорная частота. Частота гетеродина напрямую влияет на выходной фазовый шум, но уменьшается на 6 дБ после прохождения внутреннего делителя частоты, используемого для создания квадратурных сигналов гетеродина, подаваемых на вход смесителя. Влияние опорной частоты на фазовый шум определяется на основании нескольких факторов. Она используется в ФАПЧ для генерации тактовых импульсов ЦАП. Шум на выходе тактового генератора будет масштабироваться согласно передаточной функции шума ФАПЧ. Затем полученный шум будет снова масштабирован в соответствии с отношением тактовой частоты ЦАП к выходной частоте ЦАП. Этот эффект может быть упрощен до процесса масштабирования опорной частоты к выходной частоте ЦАП с применением передаточной функции фильтра нижних частот на основе ширины полосы пропускания ФАПЧ.

Далее рассмотрим составляющие фазового шума в микросхеме приемопередатчика. В ней присутствует остаточный шум, который



**Рис. 4.** Результаты измерения фазового шума, используемые для получения различных составляющих фазового шума: а) опорная частота и частота гетеродина; б) фазовый шум на выходе тракта передачи приемопередатчика; в) остаточный фазовый шум приемопередатчика

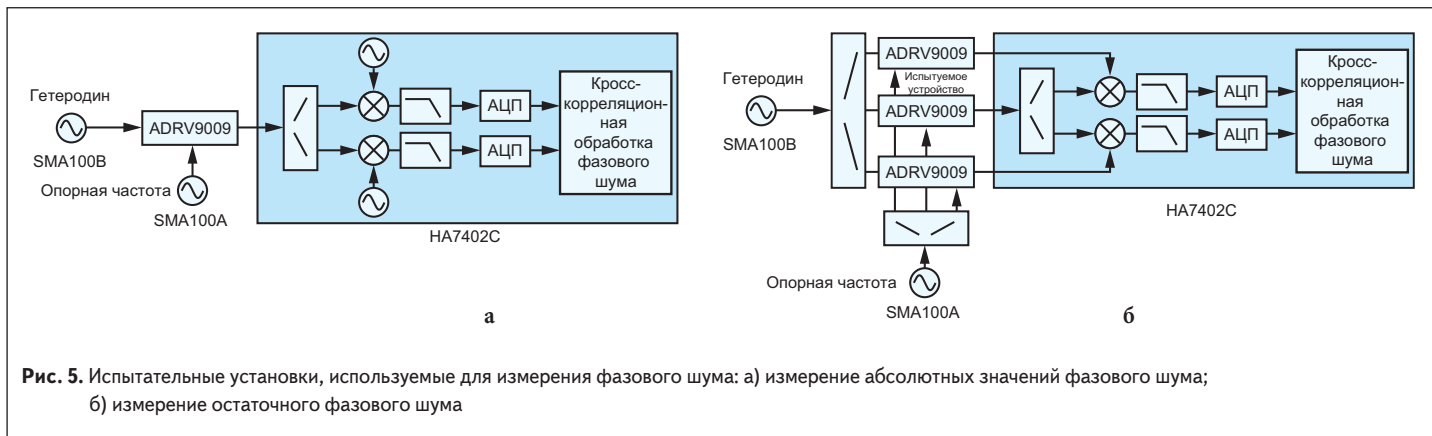


Рис. 5. Испытательные установки, используемые для измерения фазового шума: а) измерение абсолютных значений фазового шума; б) измерение остаточного фазового шума

добавляется от всех компонентов схемы в тракте передачи. Одним из факторов увеличения такого шума в микросхеме является аддитивный шум на выходе ЦАП, который изменяется в зависимости от выходной частоты ЦАП. Его можно свести к двум составляющим остаточного фазового шума — частотно-зависимый шум и частотно-независимый шум. Частотно-зависимый шум будет масштабироваться с выходной частотой ЦАП в соответствии с  $20\log N$ . Частотно-независимый шум является фиксированным и определяет минимальный уровень фазового шума приемопередатчика.

С целью получения составляющих остаточного шума микросхемы как функций частотно-зависимого и частотно-независимого шума был проведен ряд измерений фазового шума, результаты которых показаны на рис. 4.

Блок-схемы испытываемых установок, примененных для измерения фазового шума, показаны на рис. 5. Для подачи сигналов на входы опорной частоты и гетеродина приемопередатчика использовались генераторы сигналов Rohde & Schwarz SMA100A и SMA100B соответственно. Анализатор HA7402C компании Holzworth использовался в качестве контрольно-измерительного оборудования для проверки фазового шума. Для измерения абсолютного значения фазового шума выход тракта передачи приемопередатчика был подключен к контрольно-измерительному оборудованию. Для измерения остаточного фазового шума требуются три приемопередатчика, и при использовании дополнительных приемопередатчиков в качестве портов гетеродина шумовая составляющая опорной частоты и частоты гетеродина может быть удалена из результатов измерений.

Путем оценки данных измерений, представленных на рис. 4, были извлечены частотно-зависимые и частотно-независимые составляющие фазового шума микросхемы приемопередатчика. Результаты, показанные на рис. 6, получены на основе аппроксимации кривой измеренных данных и установки пороговых значений минимального уровня фазового шума при частотах смещения более 1 МГц.

### Результаты измерений абсолютных значений фазового шума в сравнении с прогнозируемыми результатами

Проводя оценку различных составляющих фазового шума, как описано в статье, можно вычислить прогнозируемые результаты на основании частоты выходного сигнала ЦАП и генераторов, используемых для задания частоты гетеродина и опорной частоты. Результаты, полученные при измерениях, и прогнозируемые результаты показаны на рис. 7.

- Составляющие были рассчитаны следующим образом:
- Составляющая фазового шума гетеродина: был использован представленный на рис. 4 измеренный фазовый шум гетеродина, который был уменьшен на 6 дБ с учетом делителя частоты в составе микросхемы приемопередатчика.
  - Составляющая фазового шума опорной частоты: в качестве отправной точки использовался измеренный шум опорной частоты, представленный на рис. 4. Предназначенный для тактирования ФАПЧ-синтезатор в составе приемопередатчика имеет полосу пропускания контура в несколько сотен килогерц, в связи с этим в отношении шума опорной частоты был использован фильтр нижних

частот второго порядка с такой же полосой пропускания. Затем шум был масштабирован по  $20\log$ , где в качестве N было принято соотношение выходной частоты ЦАП к опорной частоте.

- Составляющая шума микросхемы: были использованы кривые, представленные на рис. 6.

Результаты измерений практически совпадают с прогнозируемыми результатами, а на графиках видно, какие составляющие преобладают при различных частотах смещения. При частотах отстройки ниже 5 кГц преобладающей является составляющая шума гетеродина, а при частотах отстройки выше 1 МГц преобладает остаточный шум микросхемы. В среднем диапазоне частот отстройки 10–500 кГц преобладающей становится выходная частота ЦАП. При более высоких выходных частотах ЦАП преобладает частотно-зависимый шум микросхемы. По мере уменьшения выходной частоты ЦАП составляющая шума микросхемы уменьшается до точки, в которой частота гетеродина снова начинает преобладать.

### Рекомендации по использованию внешнего гетеродина

Следует также привести некоторые практические рекомендации для тех, кто изучает возможность использования внешнего гетеродина. Существуют два конкретных фактора, которые могут вносить ограничения:

- При использовании внутреннего делителя частоты возникает неопределенность состояния фазы при запуске или при подключении внешнего гетеродина. Встроенный гетеродин имеет функцию

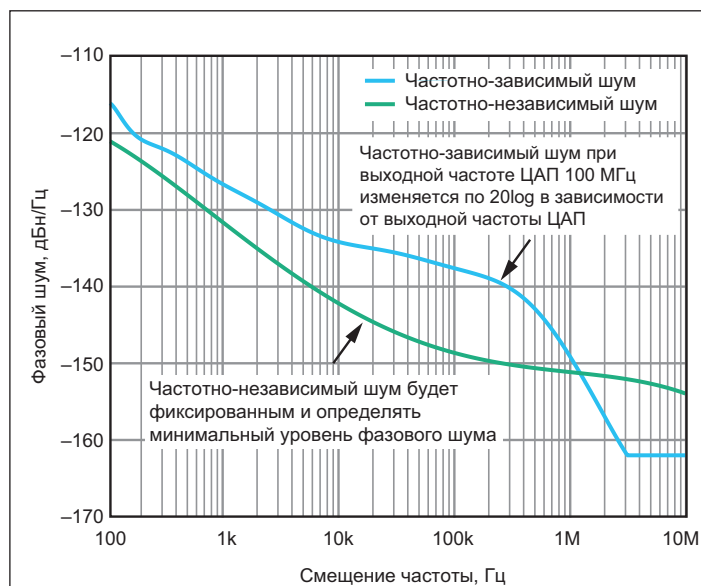


Рис. 6. Составляющие остаточного фазового шума приемопередатчика. Эти кривые были получены на основе набора данных измерений, представленных на рисунке 4

фазовой синхронизации, но при использовании внешнего гетеродина такой возможности нет.

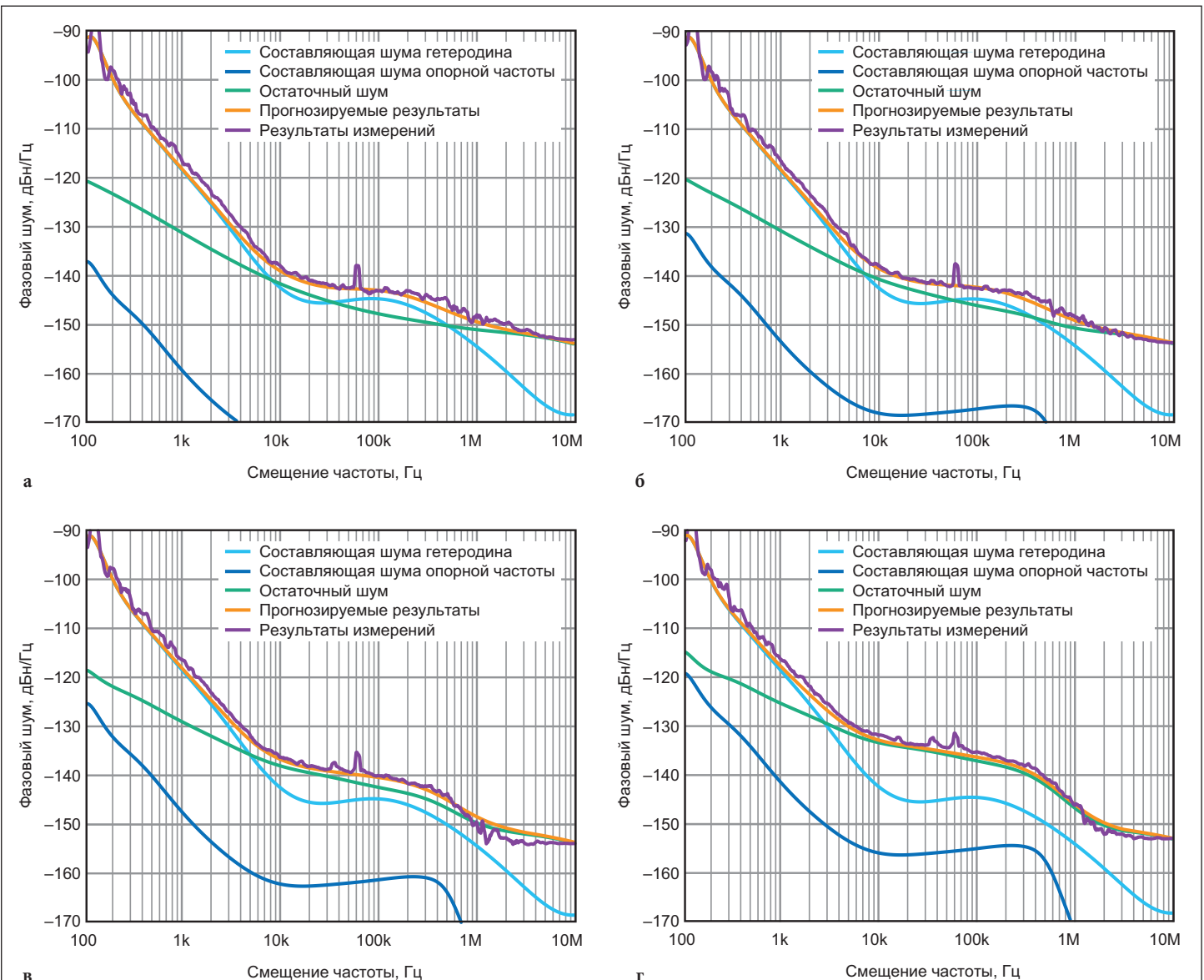
- При скачкообразном переключении внешнего гетеродина существует время установления алгоритма коррекции квадратурных искажений, которое может влиять на зашумленность зеркальной частоты в моменты непосредственно после изменения частоты.

Оба фактора приводят к усложнению многоканальных систем из-за динамического скачкообразного перехода между рабочими полосами, превышающими мгновенную полосу пропускания. В приемопередатчиках, которые будут выпущены в дальнейшем, эти ограничения могут быть преодолены, но на момент написания данной статьи эти сложности были присущи работе приемопередатчика ADRV9009 при его использовании с внешним гетеродином.

Несмотря на указанные трудности, существует большое количество вариантов применения, в рамках которых радиосистемы будут работать значительно лучше благодаря меньшему фазовому шуму внешнего гетеродина. К ним относятся любые одноканальные системы или системы с малым количеством каналов, в которых не предъявляются строгие требования к динамической скачкообразной перестройке частоты, или любые многоканальные системы с фиксированной частотой гетеродина.

Конкретным устройством, качество работы которого может быть существенно улучшено благодаря малому фазовому шуму внешнего гетеродина, является относительно узкополосная фазированная антенная решетка. В данном случае целесообразно использовать приемопередатчики для генератора сигналов и приемника, способные обеспечить широкий выбор рабочих частот, затем во время работы или окончательной реализации гетеродина выбирают конкретный частотный диапазон.

Для фазированных антенных решеток с рабочими полосами в пределах мгновенной полосы пропускания приемопередатчика внешний гетеродин может быть одночастотным, и использование приемопередатчиков в фазированной решетке с внешним гетеродином в этом случае может быть очень практичным вариантом. При оценке фазового шума системы генератор опорной частоты может быть выбран таким образом, что составляющая шума опорной частоты будет значительно ниже, чем составляющая шума гетеродина. Если в системе имеется общий гетеродин, чья работа распределена между набором приемопередатчиков когерентно объединенных в систему, составляющая шума микросхемы будет уменьшаться до уровня, при котором в системе преобладает составляющая внешнего гетеродина. Такой вывод позволяет



**Рис. 7.** Измеренный и прогнозируемый фазовый шум с использованием внешнего гетеродина: а) частота выходного сигнала ЦАП = 12,5 МГц; б) частота выходного сигнала ЦАП = 25 МГц; в) частота выходного сигнала ЦАП = 50 МГц; г) частота выходного сигнала ЦАП = 100 МГц. Частота гетеродина была установлена на 5,2 ГГц для обеспечения центральной частоты приемопередатчика 2,6 ГГц. Частота выходного сигнала ЦАП изменялась в пределах 12,5–100 МГц. Результаты предсказуемы и показывают, что данный метод анализа может быть использован для дополнительных частот

упростить анализ шума системы. Поскольку в этом случае преобладающей становится составляющая общего гетеродина, то проектная работа может быть сосредоточена на поиске оптимального соотношения цены и качества этого центрального гетеродина.

## Заключение

В статье предложен метод оценки фазового шума приемопередатчика ADRV9009 при использовании внешнего гетеродина. Этот метод позволяет наблюдать за изменением шумовых составляющих от генератора опорной частоты, гетеродина и приемопередатчика в зависимости от выходной частоты ЦАП. Измеренные и прогнозируемые результаты практически совпадают, потому данный подход может быть расширен для анализа возможностей приемопередатчика при использовании с другими источниками частоты. Этот подход также является довольно универсальным и может быть применен в отношении любого генератора сигналов.

Измеренные характеристики фазового шума при использовании внешнего гетеродина позволяют добиться существенного повышения качества функционирования системы, если разработать гетеродин с низким фазовым шумом. Цель данной статьи заключается в том, чтобы предоставить разработчикам ряд возможностей при оценке применения различных вариантов архитектуры. Для

устройств с требованиями к низким фазовым шумам, в которых применяются приемопередатчики наряду с внешним гетеродином, описанный метод обеспечивает основу для оценки фазового шума на уровне системы в различных условиях.

При оценке фазового шума системы генератор опорной частоты может быть выбран таким образом, что составляющая шума опорной частоты будет значительно ниже, чем составляющая шума гетеродина. Если в системе имеется общий гетеродин, работа которого распределена между набором приемопередатчиков этой системы, то по мере увеличения количества приемопередатчиков, когерентно объединенных в систему, составляющая шума микросхемы будет уменьшаться до уровня, при котором в системе преобладает составляющая внешнего гетеродина. Такой вывод позволяет упростить анализ шума системы. И поскольку преобладающей становится составляющая общего гетеродина, проектная работа может быть сосредоточена на поиске оптимального соотношения цены и качества этого центрального гетеродина. ■

## Литература

1. Delos P. A Review of Wideband RF Receiver Architecture Options. Analog Devices, Inc. 2017. February. [www.analog.com/en/technical-articles/a-review-of-wideband-rf-receiver-architecture-options.html](http://www.analog.com/en/technical-articles/a-review-of-wideband-rf-receiver-architecture-options.html).
2. Active Multipliers and Dividers to Simplify Synthesizers // Microwave Journal. 2007. June. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/11-2002\\_mwf\\_active\\_multipliers.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/11-2002_mwf_active_multipliers.pdf).
3. Delos P. Phase-Locked Loop Noise Transfer Functions // High Frequency Electronics. 2016. January. [www.highfrequencyelectronics.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1354:phase-locked-loop-noise-transfer-functions&catid=134:2016-01-january-articles&Itemid=189](http://www.highfrequencyelectronics.com/index.php?option=com_content&view=article&id=1354:phase-locked-loop-noise-transfer-functions&catid=134:2016-01-january-articles&Itemid=189).
4. Breitbarth J. Cross Correlation in Phase Noise Analysis // Microwave Journal. 2011. February. [www.holworth.com/Aux\\_docs/Holz\\_MWJ\\_TechFeat\\_Feb2011.pdf](http://www.holworth.com/Aux_docs/Holz_MWJ_TechFeat_Feb2011.pdf).
5. Breitbarth J., Koebal J. Additive (Residual) Phase Noise Measurement of Amplifiers, Frequency Dividers, and Frequency Multipliers // Microwave Journal. 2008. [www.microwavejournal.com/articles/6353-additive-residual-phase-noise-measurement-of-amplifiers-frequency-dividers-and-frequency-multipliers](http://www.microwavejournal.com/articles/6353-additive-residual-phase-noise-measurement-of-amplifiers-frequency-dividers-and-frequency-multipliers).
6. HA7402C Phase Noise Analyzer Engine. Holworth Instrumentation, Inc. 2018. June. [www.holworth.com/Portals/0/Manuals/HA7402%20User%20Manual%201.04.pdf](http://www.holworth.com/Portals/0/Manuals/HA7402%20User%20Manual%201.04.pdf).
7. Walls W. F. Cross-Correlation Phase Noise Measurements. Proceedings of the 1992 IEEE Frequency Control Symposium. 1992. May. <https://ieeexplore.ieee.org/document/270007>.