

# Временная синхронизация сигналов нескольких векторных генераторов сигналов SMBV 100 А компании R&S

КАРОЛИН ТРЁСТЕР (CAROLIN TRÖSTER), инженер, Rohde & Schwarz

## ВВЕДЕНИЕ

В этой статье изложена методика временной синхронизации сигналов нескольких векторных генераторов сигналов SMBV. Синхронизация приборов основана на принципе «ведущий–ведомый», когда один генератор SMBV служит ведущим и подает все необходимые сигналы синхронизации (сигнал общей тактовой частоты и запуска) к ведомым SMBV. Конфигурация обеспечивает точно синхронизированные сигналы, не требуя дополнительного внешнего модуля. Режим «ведущий–ведомый» — это стандартная функция, предусмотренная в опциях генератора модулирующих сигналов SMBV — R&S SMBV-B10, R&S SMBV-B50 и R&S SMBV-B51. Для работы в этом режиме не требуется каких-либо дополнительных опций. Данный режим может использоваться для генерации сигналов всех стандартов и произвольной формы (ARB).

Синхронизированные сигналы требуются в различных областях. Например, конфигурация «ведущий–ведомый» идеально подходит для тестирования оборудования MIMO (несколько входов, несколько выходов), некоторых сценариев испытаний GNSS и задач WLAN IEEE 802.11ac с каналами 80 МГц + 80 МГц. Синхронизированные модулирующие сигналы также служат основой для генерации фазово-когерентных РЧ-сигналов с помощью SMBV. Для этой цели режим «ведущий–ведомый» используется совместно с дополнительной опцией для SMBV, обеспечивающей фазовую когерентность. Фазово-когерентные сигналы необходимы, например, для тестирования усилителей мощности противозападных сигналов.

## КОНФИГУРАЦИЯ «ВЕДУЩИЙ–ВЕДОМЫЙ»

На рисунке 1 показана конфигурация «ведущий–ведомый» для четырех приборов SMBV. Один SMBV служит

ведущим прибором, остальные SMBV являются ведомыми. Ведущий прибор обеспечивает сигналы общей тактовой частоты и запуска (которые передаются по одному соединительному кабелю).

Между каждыми двумя приборами SMBV требуются только два соединительных кабеля: один — для синхронизации модулирующих сигналов; один — для опорной частоты 10 МГц.

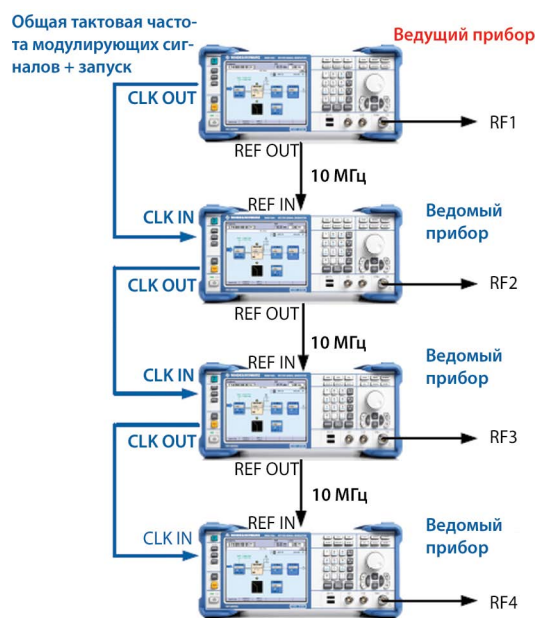


Рис. 1. Конфигурация «ведущий–ведомый» для четырех приборов SMBV

## Сокращения

ACLR	Коэффициент утечки мощности в соседний канал (Adjacent Channel Leakage Ratio)
ARB	Генератор сигналов произвольной формы (Arbitrary Waveform Generator)
CW	Непрерывное колебание (Continuous Wave)
DUT	Тестируемое устройство (Device Under Test)
EVM	Величина вектора ошибки (Error Vector Magnitude)
Galileo	Глобальная спутниковая навигационная система Европейского союза
ГЛОНАСС	Глобальная навигационная спутниковая система Российской Федерации
GNSS	Глобальная навигационная спутниковая система (Global Navigation Satellite System)
GPS	Система глобального позиционирования США (Global Positioning System)
GPS CA	Грубое определение местоположения объектов с помощью системы глобального позиционирования (Global Positioning System Coarse Acquisition)
I/Q	В фазе/со сдвигом фаз на 90° (In-Phase/Quadrature)
LO	Локальный гетеродин (Local Oscillator)
MIMO	Несколько входов, несколько выходов (Multiple Input Multiple Output)
OFDM	Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)
PA	Усилитель мощности (Power Amplifier)
РЧ	Радиочастота (Radio Frequency)
SISO	Один вход, один выход (Single Input Single Output)
WCDMA	Широкополосный множественный доступ с кодовым разделением (Wideband Code Division Multiple Access)

Сигнал синхронизации ведущего прибора подается к ведомым приборам, чтобы обеспечить общую синхронизацию модулирующих сигналов всех приборов. Сигнал синхронизации также включает в себя сигнал запуска. Это означает, что сигналы общей тактовой частоты модулирующих сигналов и запуска передаются по одному кабелю. Такой двоякий синхронизирующий сигнал повышает точность запуска и гарантирует, что все SMBV начинают генерацию сигнала одновременно.

Частота передаваемого сигнала общей тактовой частоты всегда составляет 50 МГц. Сигнал усиливается приборами, чтобы предотвратить ослабление сигнала при последовательном соединении более двух приборов. Кроме того, обеспечивается согласование импеданса 50 Ом.

Конфигурации «ведущий-ведомый» присуща погрешность синхронизации, обусловленная тем, что сигнал запуска должен пройти от ведущего прибора к ведомому, а затем от ведомого прибора — к следующему ведомому. Задержка сигнала запуска зависит от длины соединяющих приборы кабелей. Ведомому прибору требуется некоторое время для внутренней обработки сигнала запуска, прежде чем прибор подаст на выход РЧ-сигнал. Однако эта внутренняя задержка автоматически компенсируется ведомым SMBV. Кроме того, SMBV также может компенсировать задержку сигнала запуска в соединительных кабелях. Для этого пользователю следует только ввести длину кабелей. Такая автоматическая компенсация задержки позволяет достичь практически идеальной временной синхронизации, не превышающей 1 нс.

В обычных кабелях с разъемами BNC используется диэлектрик с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 2,7$  (или близкой). Погрешность синхронизации < 1 нс может быть достигнута только в том случае, если используются кабели с такой диэлектрической проницаемостью и физические длины кабелей введены правильно. По умолчанию используется значение 0,5 м. Использование более длинных или коротких кабелей, если настройка длины кабелей не осуществлена должным образом, приведет к некомпенсированной задержке, которая может достигать нескольких наносекунд. Для диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r = 2,7$  скорость распространения сигнала в кабеле равна  $c/\sqrt{\epsilon_r} = 1,8 \cdot 10^8$  м/с, где  $c$  — скорость света. Таким образом, задержка сигнала запуска на кабеле длиной 1 м составляет 5,5 нс. Например, если используется кабель длиной 1 м и настройка длины кабеля не изменена, расхождение составит 50 см, что приведет к некомпенсированной задержке 2,75 нс.

На рисунке 2 приведен пример настроек для 2-го ведомого прибора SMBV с соединительными кабелями длиной 1 м от ведущего к первому ведомому и 0,5 м от первого ко второму ведомому.

Хорошая синхронизация модулирующих сигналов, как правило, приводит к хорошей синхронизации РЧ-сигналов. В некоторых случаях каскады РЧ SMBV могут оказывать незначительное влияние на синхронизацию. Например, если в двух SMBV используются различные выходные уровни РЧ-сигналов, настройки ступенчатых аттенуаторов могут отличаться, и это может привести к нескольким различным переходным временам в каскадах РЧ. Однако это влияние будет малым. Дополнительная разница по времени составит менее 1 нс.

Для задач с чрезвычайно жесткими требованиями к точности синхронизации можно выполнить проверку и даже оптимизацию (если применимо) синхронизации сигналов SMBV с помощью простой измерительной схемы, требующей только обычного осциллографа, например R&S®RTM. Схема измерений показана на

рисунке 3. Следует обратить внимание на то, что кабели, подающие сигналы I к осциллографу, должны быть одинакового типа и абсолютно одинаковой длины. Оптимизация синхронизации SMBV может потребоваться, например, в том случае, если точная длина радиокабелей неизвестна и в ведомые SMBV можно ввести только приблизительные длины.

Для точного временного согласования SMBV используется простой и быстрый метод. Сначала с помощью курсоров осциллографа измеряется разница по времени между сигналами I ведущего и ведомого приборов. Для этих измерений оба SMBV должны генерировать (временно) одинаковые модулирующие сигналы. Например, предположим, что измеренная разница между двумя кривыми составляет 38 нс (см. рис. 4), как это может быть при отключенной автоматической компенсации задержки. (Для примера мы выбрали большую разницу, поскольку

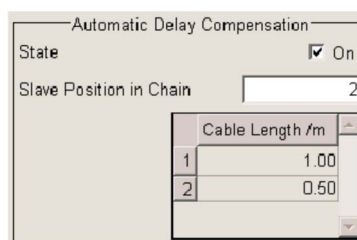


Рис. 2. Пример настроек приборов SMBV



Рис. 3. Схема измерения временного согласования модулирующих сигналов

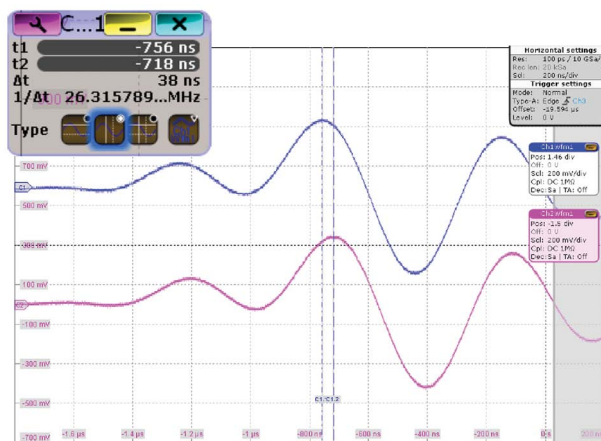


Рис. 4. Сигналы I ведущего и ведомого приборов во временной области перед совмещением по времени





образом можно одновременно сгенерировать до 24 спутниковых сигналов (см. рис. 7). Чтобы обеспечить одновременное начало генерации сигналов обоими приборами, используется конфигурация «ведущий–ведомый».

Как правило, для обеспечения точной временной синхронизации SMBV во всех сценариях испытаний GNSS необходимо использовать конфигурацию «ведущий–ведомый» с автоматической компенсацией задержки. Это важно, поскольку в противном случае систематическая ошибка псевдодальности может быть существенной. Псевдодальность вычисляется умножением скорости света ( $c$ ) на время, которое требуется сигналу для прохождения от спутника к приемнику. Погрешность временной синхронизации SMBV приведет к систематической ошибке при определении псевдодальности, как показано в следующих двух примерах.

- Погрешность синхронизации 38 нс:
- систематическая ошибка определения псевдодальности =  $38 \text{ нс} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 11,4 \text{ м}$ .
- Погрешность синхронизации 1 нс:
- систематическая ошибка определения псевдодальности =  $1 \text{ нс} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 0,3 \text{ м}$ .

При очень высокой точности 1 нс погрешность псевдодальности уменьшается до 0,3 м.

Величина допустимой для тестирования систематической ошибки при определении псевдодальности зависит от задачи. В таблице 1 приведен краткий обзор различных задач GPS, и указаны требуемые для них диапазоны точности.

Для задач, в которых приемник анализирует фазу несущей сигнала GNSS, требуются фазово-когерентные РЧ-сигналы. В этом случае конфигурацию «ведущий–ведомый» необходимо дополнить и выполнить фазовую калибровку РЧ-сигналов (см. ниже).

#### ГЕНЕРАЦИЯ ФАЗОВО-КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ

Сама по себе конфигурация «ведущий–ведомый» не обеспечивает фазово-когерентных сигналов несущей. Она обеспечивает только точно синхронизированные по времени сигналы. Однако конфигурацию «ведущий–ведомый» служит основой для генерации фазово-когерентных векторных сигналов с помощью нескольких SMBV. Стабильная взаимосвязь фаз двух РЧ-несущих достигается с помощью сигнала общего локального гетеродина (LO), используемого для преобразования с повышением частоты синхронизированных по времени модулирующих сигналов в сигналы РЧ. Это сводит к минимуму дрейф фазы между несущими РЧ. Для генерации фазово-когерентных сигналов имеется дополнительная опция R&S®SMBV-B90 к SMBV. Она позволяет передать сигнал локального гетеродина, генерируемый одним SMBV, к другим SMBV, что позволяет использовать в нескольких I/Q-модуляторах один сигнал локального гетеродина.

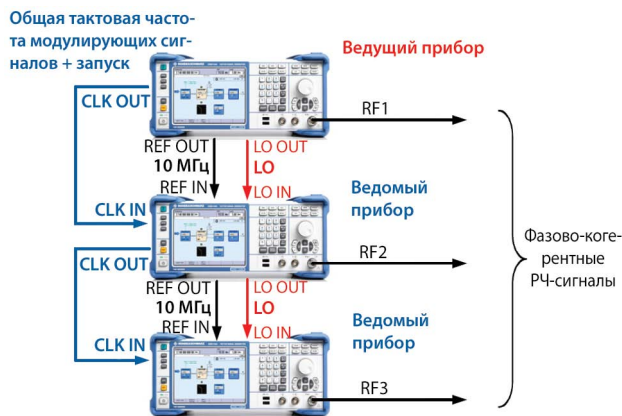


Рис. 8. Конфигурация для генерации трех фазово-когерентных сигналов (с вступительным запуском)

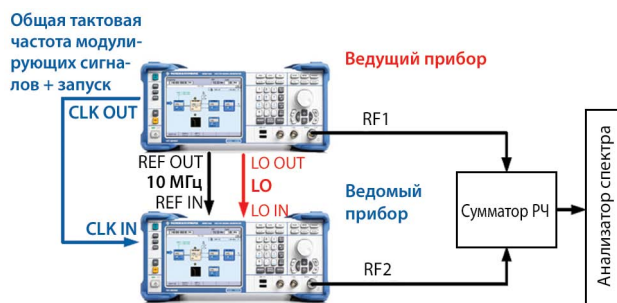


Рис. 9. Схема измерений для фазовой калибровки

Следовательно, все ведомые SMBV будут иметь ту же радиочастоту, что и ведущий SMBV.

Более подробное введение в понятие фазовой когерентности можно найти в указаниях по применению оборудования [1—2]. Измерительная схема представляет собой просто конфигурацию «ведущий–ведомый» с дополнительными соединениями для локального гетеродина (см. рис. 8).

Сигнал локального гетеродина, генерируемый ведущим прибором, подается к нескольким ведомым приборам по простой последовательной цепи.

Для предотвращения ослабления сигнала LO при каскадном включении более двух приборов сигнал LO до передачи усиливается приборами. Конечно, качество сигнала LO несколько ухудшается при подключении каждого дополнительного прибора. Также ухудшается качество сигнала РЧ, поэтому невозможно каскадное включение неограниченного числа приборов. Однако тестирование с четырьмя SMBV показывает одинаково хорошие величины вектора ошибки (EVM) всех приборов.

Таблица 1. Краткий обзор различных задач GPS и требуемые для них диапазоны точности

Диапазоны точности для различных задач GPS		
Сфера применения	Диапазон точности, м	Конфигурация для тестирования
Коммерческий код GPS C/A, синхронизация по коду	10—15	«Ведущий–ведомый»
Коммерческий код GPS C/A, синхронизация по коду + фазе несущей	10—15	«Ведущий–ведомый» + опция обеспечения фазовой когерентности
GPS для военного применения, коды C/A и P	5—10	«Ведущий–ведомый»
На нескольких частотах, например, GPS L1 и L2	5	«Ведущий–ведомый»

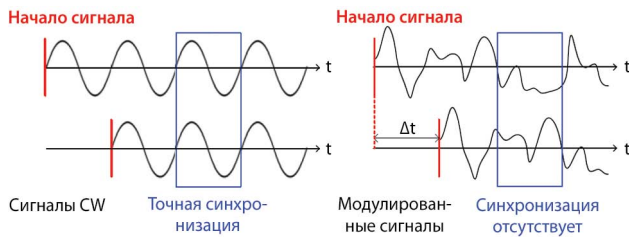


Рис. 10. Влияние неодновременного запуска в случае двух CW-сигналов (после калибровки фазы) и в случае двух модулированных сигналов

### ФАЗОВАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ В СЛУЧАЕ НЕПРЕРЫВНОГО КОЛЕБАНИЯ (CW)

Общий сигнал LO обеспечивает стабильное фазовое соотношение между двумя РЧ-несущими, т.е. разность фаз ( $\Delta\phi$ ) остается постоянной. Поэтому РЧ-сигналы являются фазово-когерентными. Однако разность фаз неизвестна. Вопрос в том, каково точное значение разности фаз и как его сделать равным заданной величине? Метод, используемый для выполнения такой фазовой калибровки, подробно описан в указании в руководстве по применению [1]. Схема измерений показана на рисунке 9.

Фазовую калибровку можно выполнить или вручную, или с помощью программного инструмента (входящего в состав 1GP67). В любом случае калибровка выполняется с CW-сигналами. Для калибровки и последующей регулировки фазы необходимо задать фазовый сдвиг SMBV. В силу того, что РЧ-тракты соединены (общий LO), этот фазовый сдвиг нельзя задать непосредственно в блоках РЧ — его необходимо установить в блоках модулирующих сигналов SMBV. Поэтому применение I/Q-модуляции обязательно при использовании общего сигнала LO. Это означает, что РЧ-несущие (сигналы CW) генерируются с помощью блока модулирующих сигналов, например, с помощью функции CDM (Custom Digital Modulation — пользовательская цифровая модуляция) модуляции BPSK и источника данных "All 1" («все 1») или с помощью генератора ARB для воспроизведения сигнала CW, сформированного посредством программного обеспечения для моделирования R&S®WinIQSIM2.

Метод калибровки основан на том, что два сигнала CW одинаковой частоты и уровня полностью гасят друг друга, если сдвиг фазы между ними составляет  $180^\circ$ . Таким образом, уровень сигнала на выходе сумматора служит показателем разности фаз. Чем меньше этот уровень, тем ближе разность фаз к  $180^\circ$ .

Как правило, необходимый для совмещения фаз РЧ-несущих фазовый сдвиг остается неизменным после выключения и повторного включения SMBV. Поэтому необходимый фазовый сдвиг следует определить только один раз, и затем его можно использовать на протяжении длительного периода времени при условии, что конфигурация оборудования и относящиеся к калибровке настройки остаются неизменными, а SMBV прогреты. Калибровку необходимо выполнить повторно в случае существенных изменений конфигурации, например замены кабелей, изменения температуры окружающей среды, изменения радиочастоты и т.д.

### ФАЗОВАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ В СЛУЧАЕ I/Q-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Согласно принципу работы опции для обеспечения фазовой когерентности R&S®SMBV-B90, сигналы CW

необходимо генерировать с помощью блока модулирующих сигналов посредством I/Q-модуляции. Однако в дальнейшем «I/Q-модулированный сигнал» следует всегда понимать как действительно модулированный сигнал.

Строго говоря, понятие фазовой когерентности определено только для CW-несущих с равными частотами (или для CW-несущих с кратными частотами). Несмотря на это, опцию для обеспечения фазовой когерентности SMBV можно также использовать для I/Q-модулированных сигналов. В этом случае фазовая когерентность определяется только для средних несущих модулированных сигналов.

Такие сигналы используются, например, в приложениях MIMO с формированием диаграммы направленности, при измерениях фазы несущей GNSS, в военных применениях и для тестирования усилителей мощности противозападных сигналов.

Для обеспечения фазовой когерентности модулированных сигналов совершенно необходима точная синхронизация источников сигналов. Фазовая калибровка сигналов CW обеспечивает совпадение фаз РЧ-сигналов. При этом в силу периодичности CW-сигналов точная синхронизация начала таких сигналов не имеет значения. Напротив, для I/Q-модулированных сигналов одновременный запуск очень важен, поскольку в противном случае сигналы сместятся по времени (см. рис. 10).

Поэтому необходимо использовать конфигурацию «ведущий–ведомый», т.к. она обеспечивает точную синхронизацию РЧ-сигналов. При этом следует выполнить временную синхронизацию SMBV, используя в качестве опорного сигнала модулирующий сигнал I/Q. После процедуры временной синхронизации нет необходимости повторно выполнять калибровку фазы при изменении модулирующего сигнала, например, при использовании вместо сигнала Custom Digital Modulation сигнала ARB.

При наличии опасений, что кабели и сумматор могут внести задержки, которые ухудшат временную синхронизацию, для точной подстройки временной синхронизации всего комплекса можно использовать схему измерений, показанную на рисунке 9. Однако при использовании высококачественного сумматора и кабелей равной длины такая регулировка, как правило, не требуется.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конфигурация «ведущий–ведомый» обеспечивает превосходную временную синхронизацию нескольких SMBV. Преимущества пользователя заключаются в очень простой конфигурации и простоте настройки приборов. При правильной настройке SMBV их выходные сигналы точно синхронизированы с погрешностью менее 1 нс. Благодаря этому конфигурация «ведущий–ведомый» является идеальной испытательной схемой для широкого спектра задач, таких как основные испытания систем MIMO с имитацией замирания, сценарии испытаний GNSS с участием до 24 спутников и задачи WLAN IEEE 802.11ac с каналами 80 МГц + 80 МГц.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Регулировка фаз двух источников сигналов MIMO с помощью опции B90. (1GP67).
2. Руководство по схемам испытаний для MIMO — часть 1. (1GP50).
3. Rohde & Schwarz. Указание по применению оборудования «Полярная модуляция с помощью R&S®SMU200A» ("Polar Modulation with R&S®SMU200A") (1GP58).
4. W. Gerhard, R. Knochel. WCDMA outphasing power amplifier with a software defined transmitter/receiver architecture for determination of the predistortion function/www.adv-radio-sci.net.