

# МАЛОШУМЯЩИЙ ИСТОЧНИК ОПОРНОЙ ЧАСТОТЫ 3,2 ГГц

В статье рассмотрен вопрос формирования высокочастотного сигнала опорной частоты с фазовым шумом, приведенным к 1 ГГц, менее -160 дБн/Гц на отстройке 10 кГц. Описаны характеристики источников различных производителей, в частности, подробно представлено решение компании «Адвантех».

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ ОПОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

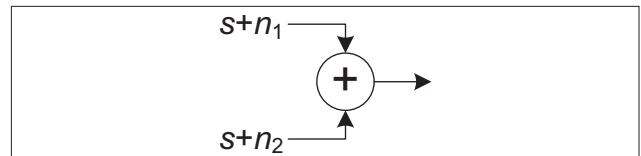
С развитием техники в мире появились образцы широкополосных синтезаторов (с перестройкой не менее октавы), имеющие собственный вносимый фазовый шум, нормированный к 1 ГГц, около -160 дБн/Гц. Для таких малошумящих синтезаторов необходим высокочастотный опорный сигнал, имеющий фазовый шум того же порядка. Применение именно высоких опорных частот диктуется не только архитектурой широкополосных синтезаторов. Если за критерий качества сигнала принять относительный, т. е. нормированный к определенной частоте фазовый шум, то поскольку абсолютный фазовый шум пропорционален квадрату частоты, требования к высокому уровню сигнала относительно теплового шума, а также ко всем элементам тракта — усилителям, смесителям, умножителям, схемам питания и т. д. — существенно смягчаются.

В таблице 1 приведены характеристики различных малошумящих источников отечественного и иностранного производства, в том числе созданный в компании «Адвантех» источник опорной частоты 3,2 ГГц серии ENO-3G-1xM. Следует отметить, что на момент подготовки статьи для генератора компании NEL FC доступно лишь предварительное описание и используемый в нем метод не указан. Подробности о различных подходах построения опорных генераторов и их теоретических возможностях можно найти в [1].

## ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА НА ОСНОВЕ СЛОЖЕНИЯ ЧАСТОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ

Метод сложения частот когерентных источников с некоррелированным шумом, используемый в источнике ENO-3G-1xM, хорошо известен и может быть проиллюстрирован на примере сложения во временной области двух одинаковых сигналов  $s$ , но с независимым шумом  $n_1$  и  $n_2$  (рис. 1).

Отношение сигнал/шум суммы сигналов в таком случае может быть записано следующим образом:

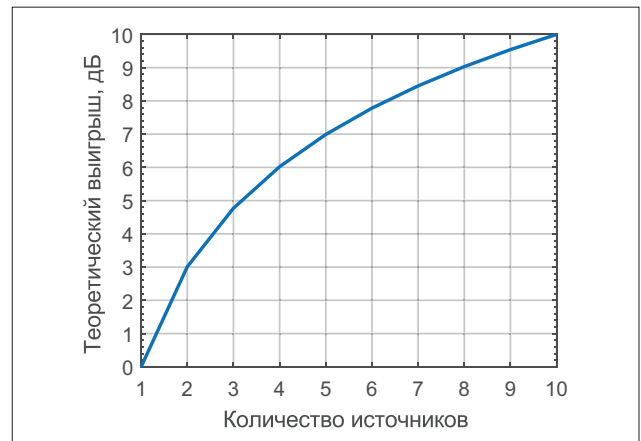


▲ Рис. 1. Модель сложения сигналов двух коррелированных источников с независимым шумом

$$SNR = \frac{\langle (s+s)^2 \rangle}{\langle (n_1+n_2)^2 \rangle} = \frac{4 \langle s^2 \rangle}{\langle n_1^2 \rangle + 2 \langle n_1 n_2 \rangle + \langle n_2^2 \rangle}$$

где  $\langle \rangle$  — оператор усреднения. Поскольку  $n_1$  и  $n_2$  не коррелированы, то  $\langle n_1 n_2 \rangle = 0$ . Если мощности шума  $n_1$  и  $n_2$  равны, то есть  $\langle n_1^2 \rangle = \langle n_2^2 \rangle = \langle n^2 \rangle$ , то:

$$SNR = \frac{2 \langle s^2 \rangle}{\langle n^2 \rangle}$$



▲ Рис. 2. Улучшение фазового шума в зависимости от количества источников

Таблица 1. Таблица опорных генераторов различных производителей и их краткие характеристики

Название компании	Модель (опция)	Частота, МГц	Фазовый шум в дБн/Гц, приведенный к 1 ГГц на отстройке:					Метод
			10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	
NEL Frequency Controls	O-ESQ (Grade E4)	500	-96	-125	-150	-165	-167	Данные отсутствуют
TriSynth Technology	TRISLCO-10240	10240	-80	-115	-145	-175	-190	Лейкосапфировый резонатор
Ingenieurbüro Gronefeld	GDR02998	2998	-67	-110	-140	-170	-185	Диэлектрический резонатор
«Микран»	MMXO-500C	500	-84	-116	-144	-162	-164	Умножение частоты генератора на SC-кварце
Wenzel	GMXO-FR	500	-83	-120	-144	-162	-164	Умножение частоты генератора на SC-кварце
Rakon	LNO 3200 B3	3200	-87	-112	-142	-162	-166	Умножение частоты генератора на ПАВ-резонаторе
«Адвантех»	ENO-3G-1xM	3200	-85	-115	-149	-162	-163	Сложение частот нескольких генераторов на SC-кварце

результатирующее отношение на 3 дБ лучше, чем у исходных сигналов. Использование  $M$  таких источников сигнала дает выигрыш  $10\lg(M)$  (рис. 2).

Данный подход имеет как преимущества, так и недостатки. К преимуществам можно отнести следующие:

- Масштабируемость — улучшение характеристик пропорционально  $10\lg(M)$ . При использовании более продвинутых схем кварцевых генераторов вполне реально приблизиться к уровню  $-170$  дБн/Гц, при этом оставшись в пределах разумного количества источников.
- Результирующий фазовый шум определяется суммой всех источников, отклонение уровня шума одного из них при увеличении  $M$  слабо влияет на результат, что приводит к высокой повторяемости и низкому проценту отбраковки кварцевых резонаторов при серийном производстве.
- При сложении частот отдельных источников автоматически получается сигнал на более высокой частоте, что уменьшает дополнительные преобразования типа умножения на диодах или выделения гармоник с последующей фильтрацией и усилением, которые неизбежно вносят потери, порой существенные. По этой причине более высокочастотный источник, как правило, имеет худший приведенный фазовый шум относительно низкочастотного аналога, например Wenzel GMXO-FR 2500 МГц на 2–3 дБ хуже в сравнении с генератором той же серии на 500 МГц.

Среди недостатков можно отметить большие относительно отдельного кварцевого генератора габариты и энергопотребление.

Увеличение стоимости в связи с использованием большего количества источников сложно однозначно отнести к недостаткам, поскольку в традиционном подходе при производстве аналогичного по характеристикам генератора цена резко возрастает за счет отбраковки и необходимости использовать более высокую мощность на низких частотах, что накладывает определенные ограничения на сами резонаторы и их конструктивное исполнение.

### СРАВНЕНИЕ СХЕМ СЛОЖЕНИЯ ЧАСТОТ

Если выбор количества источников в основном определяется заданными габаритами изделия, то формирование заданной выходной частоты может быть реализовано различными способами. Сравним разные подходы, взяв за критерий потери приведенного к одной частоте фазового шума. Для простоты будем считать, что элементы собственный шум не вносят, и будем учитывать только тепловой шум. Соответственно, фазовый шум источников  $S_\varphi$  определяется лишь значением спектральной плотности мощности теплового шума  $N_0$  и уровнем сигнала  $P_s$  и равен  $N_0/P_s$ .

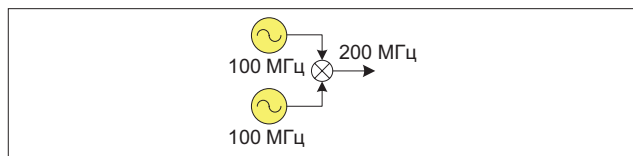
Первый способ заключается в перемножении сигналов на смесителях от разных источников на первом этапе, а умножение результирующего сигнала — на последующем. На рис. 3 представлен пример первого этапа преобразования для одной пары источников.

Для определения результирующего шума на выходе разделим схему на две части — идеальное частотное преобразование и аддитивный шум на выходе, рис. 4.

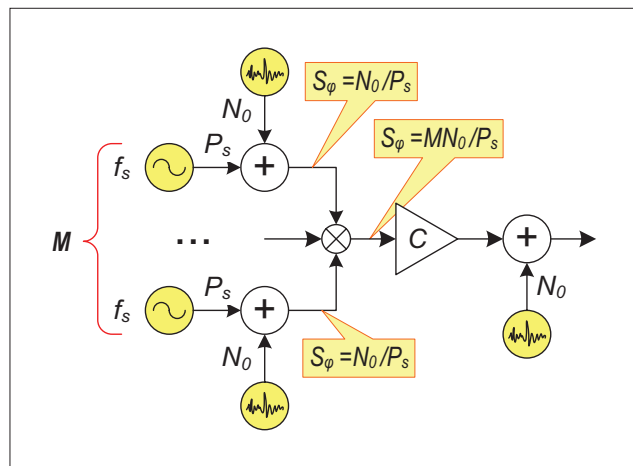
Тогда фазовый шум выходного сигнала  $S_{\varphi r}$ , приведенный к частоте источника, можно выразить следующим образом:

$$S_{\varphi r} = \frac{1}{M} \frac{N_0}{P_s} \left( 1 + \frac{1}{MC} \right),$$

где  $C$  — коэффициент преобразования схемы, в данном случае одного смесителя (mixer conversion loss),  $M$  — количество источников. Таким образом, потери преобразования  $L_1$  составляют:



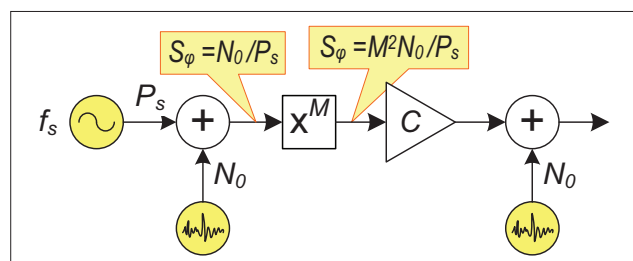
▲ Рис. 3. Схема формирования с непосредственным перемножением сигналов с выходов источников



▲ Рис. 4. Упрощенная модель для оценки потерь в случае независимых источников

$$L_1 = 1 + \frac{1}{MC}. \quad (1)$$

Второй способ заключается в умножении частоты каждого источника на первом этапе и их перемножении на последующем (рис. 5).



▲ Рис. 5. Упрощенная модель для оценки потерь в случае умножения частоты одного источника

В этом случае, аналогично предыдущей модели, можем записать:

$$S_{\varphi r} = \frac{N_0}{P_s} \left( 1 + \frac{1}{M^2 C} \right),$$

где  $C$  — коэффициент преобразования схемы умножителя (insertion loss),  $M$  — коэффициент умножения частоты, потери преобразования  $L_2$  составляют:

$$L_2 = 1 + \frac{1}{M^2 C}. \quad (2)$$

Следует помнить, что выражения (1) и (2) выведены для источников с фазовым шумом, определяемым тепловой полкой, и отражают максимальные потери. При увеличении шума источников потери любого преобразования уменьшаются, так как шум, вносимый элементами, в том числе тепловой, все меньше сказывается на результате. Данные выражения приме-

Таблица 2. Сравнительная таблица различных методов умножения частоты

Метод	Коэффициент умножения $M$	Коэффициент передачи при преобразовании $C$		Теоретические максимальные потери в уровне фазового шума $L$	
		дБ	Ед.	Ед.	дБ
Перемножение сигналов на смесителе от разных источников	2	-6	0,25	3	4,8
Умножение частоты на элементе АМК-2-13+ (Mini-Circuits)	2	-11	0,08	4,1	6,2
Выделение гармоники фильтрацией меандра	3	-14	0,05	3,2	5,0
Выделение гармоники фильтрацией меандра	5	-20	0,01	5,0	7,0

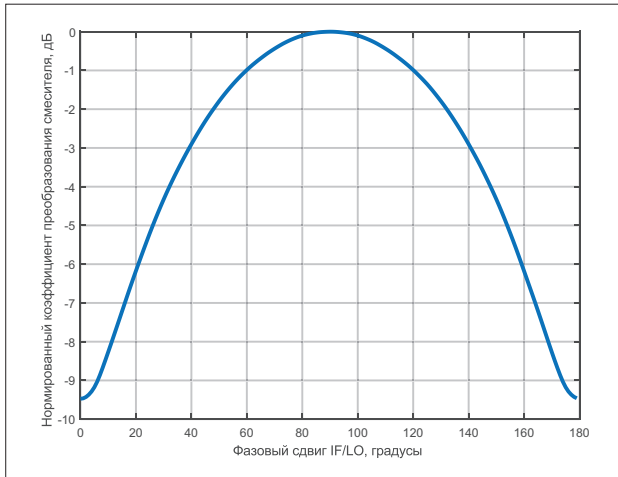


Рис. 6. График зависимости нормированного коэффициента преобразования

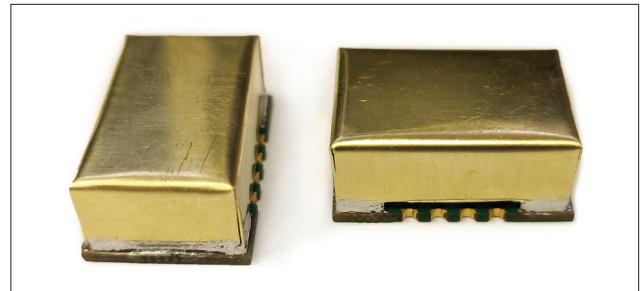


Рис. 7. Внешний вид управляемого кварцевого генератора ОСХО-100-1хМ

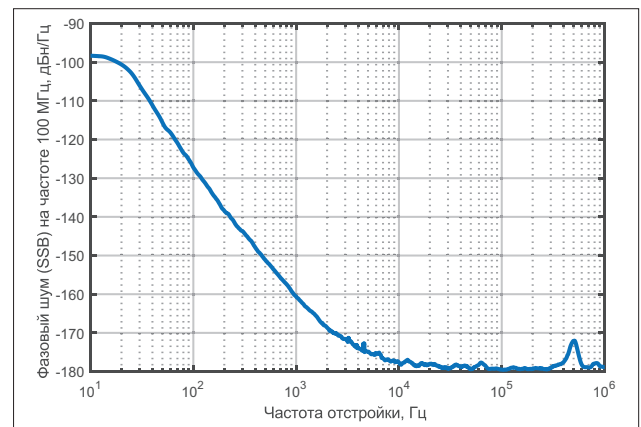


Рис. 8. Фазовый шум отдельного кварцевого генератора ОСХО-100-1хМ в петле ФАПЧ

нимы для количественного сравнения различных схем формирования частоты.

В таблице 2 представлены расчетные максимальные потери фазового шума для различных схем умножения частоты. Коэффициент передачи  $C$  взят из практической реализации данных схем для частоты 100 МГц.

Из таблицы следует, что метод перемножения сигналов на смесителе от разных источников имеет наименьшие потери в первую очередь за счет малых потерь мощности. Однако в данной схеме есть ряд технических сложностей. Во-первых, коэффициент передачи в значительной степени зависит от разности фаз подаваемых на смеситель сигналов. На рис. 6 представлен результат моделирования нормированного коэффициента передачи двойного балансного смесителя, то есть максимум соответствует -6 дБ в таблице 2.

Как показало макетирование, положение максимума в реальном смесителе может несколько отличаться от  $90^\circ$ , но качественная зависимость сохраняется. Таким образом, в практической реализации схемы необходим контроль сдвига фаз, что приводит

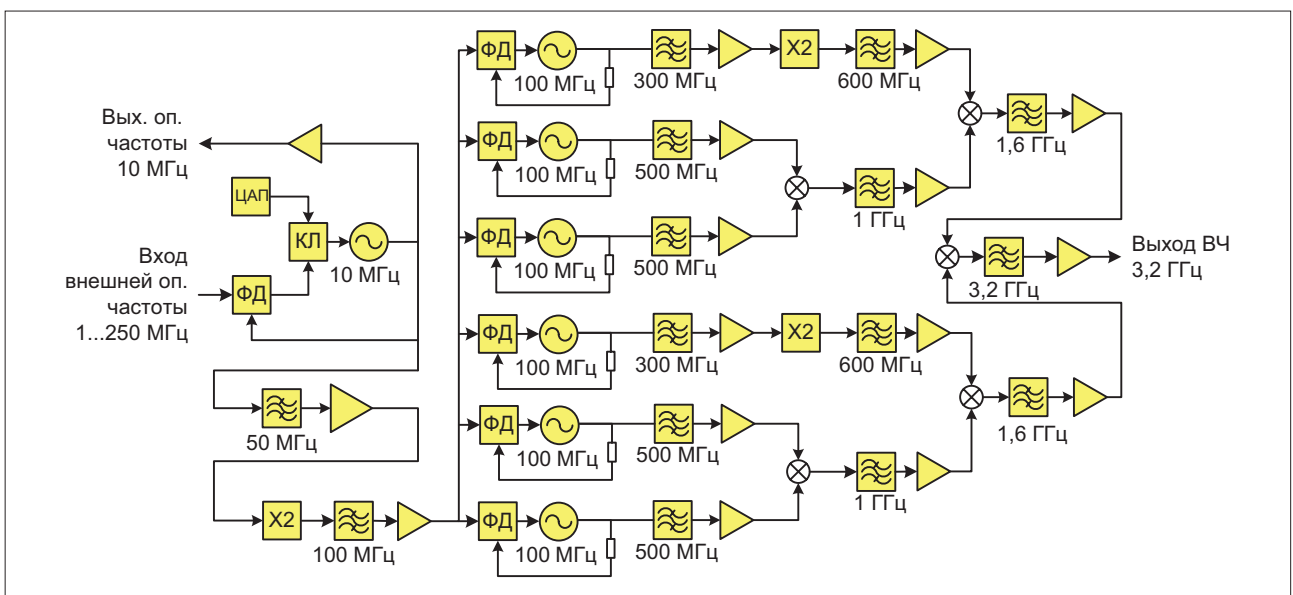
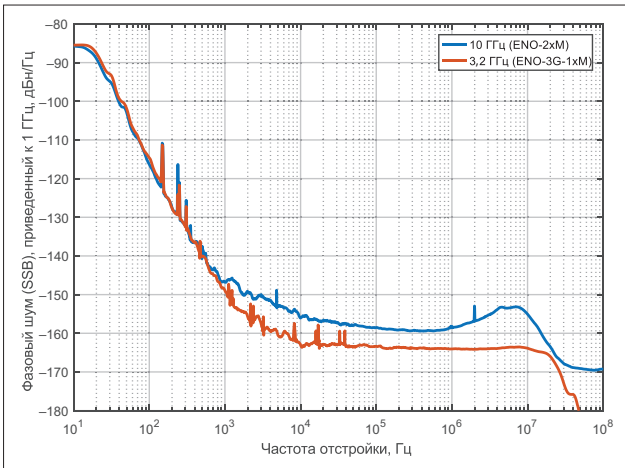


Рис. 9. Блок-схема синтезатора опорной частоты ЕНО-3Г-1хМ



▲ **Рис. 10.** Приведенный фазовый шум сигнала опорной частоты 3,2 ГГц (красный) и выходного сигнала широкополосного синтезатора ENO-2xM при работе от опорного сигнала (синий)

к усложнению. Во-вторых, без принятия специальных мер возможны сложности с захватом в петлях ФАПЧ источников, поскольку возможно прохождение сигнала от соседнего генератора через смеситель.

#### ИСТОЧНИК ОПОРНОГО СИГНАЛА ENO-3G-1xM

Базовым элементом ENO-3G-1xM является управляемый кварцевый генератор (VCXO) с частотой 100 МГц. Поскольку данный генератор должен обладать не только малым шумом и небольшими габаритами, но и иметь невысокую стоимость, был разработан кварцевый генератор серии ОСХО-100-1xM в виде сборки под SMD-монтаж с габаритами 21,2×14×10 мм (рис. 7). В генераторе использована схема на инверторах с кварцем с SC-срезом [2] и применена термостабилизация. Фазовый шум одного такого генератора в составе ENO-3G-1xM представлен на рис. 8. Существенного уменьшения стоимости можно достичь за счет применения кварцевого резонатора на АТ-срезе, но в таком случае на отстройках до 1 кГц фазовый шум будет хуже на 7–10 дБ.

Использование в генераторе инвертора в качестве буферного каскада обеспечивает выходное напряжение в форме меандра. Это обстоятельство облегчает получение нечетных гармоник выходной частоты. Оценки, приведенные в таблице 2, показывают, что выделение третьей гармоники имеет преимущество. Несмотря на это, при построении источника опорной частоты 3200 МГц приходится также использовать выделение пятой гармоники. Это обусловлено планом суммирования частот парциальных колебаний для получения заданной выходной частоты источника.

Ниже представлены варианты формирования коэффициента 32 для различного количества источников и максимально возможный выигрыш относительно одного источника:

- 4 источника:  $[(5+3) + (5+3)] \times 2 \times 2$  6 дБ
- 6 источников:  $(5+5+3 \times 2) + (5+5+3 \times 2)$  7,8 дБ
- 8 источников:  $[(5+3) + (5+3) + (5+3) + (5+3)]$  9 дБ

Блок-схема высокочастотного источника опорной частоты ENO-3G-1xM приведена на рисунке 9. Он состоит из набора идентичных ячеек ФАПЧ, смесителей, фильтров и усилителей. В качестве внутреннего опорного сигнала для петель ФАПЧ используется высокостабильный кварцевый генератор с частотой 10 МГц. Далее частота умножается на 10. Поскольку сигнал на выходе кварцевого генератора имеет прямоугольную форму, то пятая гармоника сразу отфильтровывается и умножается на 2. Затем полученная частота 100 МГц подается на вход опорной частоты ячеек ФАПЧ. Данный подход позволяет уменьшить фазовый шум при отстройках до 20 Гц за счет увеличения частоты работы фазовых детекторов, а также устра-

нить негармонические составляющие на выходе ячеек ФАПЧ, так как частота сравнения получается равной их выходной частоте.

Управление микросхемами ФАПЧ осуществляется параллельно для всех базовых ячеек, поскольку они полностью идентичны. Таким образом, количество ячеек (кварцевый генератор плюс ФАПЧ) можно масштабировать без помощи дополнительных аппаратных средств в пределах технической целесообразности.

#### ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКА

В качестве примера применения источника ENO-3G-1xM можно привести синтезатор компании «Адвантех» серии ENO-2xM. Это широкополосный синтезатор с выходной частотой от 100 МГц до 21 ГГц, шагом 100 МГц, использующий внешнюю опорную частоту 3,2 ГГц. При отстройке опорной частоты в пределах  $\pm 16$  МГц реализуется непрерывный шаг перестройки выходной частоты во всем диапазоне до 21 ГГц. Синтезатор выполнен в виде моноблока габаритами 186,5×135×14 мм.

На рис. 10 приведен график нормированного фазового шума сигнала опорной частоты 3,2 ГГц с выхода источника ENO-3G-1xM и сигнала 10 ГГц с выхода широкополосного синтезатора ENO-2xM, работающего от данной опорной частоты. Из графика следует, что за исключением ближней области до 1 кГц, дальнейшее уменьшение полки фазового шума опорного сигнала незначительно повлияет на фазовый шум выходного сигнала широкополосного синтезатора ENO-2xM, то есть в целом по характеристикам они сбалансированы относительно друг друга. ●

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Панов В. И. Системы с малой дисциplinацией. М.: Наука. 1981.
2. Rohde U. L., Poddar A. K., Boeck G. The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications: Theory and Optimization. Wiley, New York, 2005.