



УДК 621.396.96

Гетеродины СМ-диапазона с низким уровнем фазовых шумов.

Е.Г. Молчанов, Д.С. Очков, Е.А. Силаев, И.С. Формальнов, Д.В. Чубаров

Приведены результаты разработки и исследования источников высокостабильных сигналов и опорных частот для связи и радиолокации СМ-диапазона.

Ka-band low phase noise signal sources.

E.G. Molchanov, D.S. Ochkov, E.A. Silaev, I.S. Formalnov, D.V. Chubarov

Results of research and design of high stability signal sources for Ka-band communication and radar systems are presented.

Введение.

Стандартными требованиями для гетеродинов современной аппаратуры являются:

- высокая надежность, малые размеры и вес, а также небольшое энергопотребление, что возможно только при применении самой современной элементной базы и высококачественных материалов;
- высокая стабильность частоты гетеродинов, что обуславливает применение опорных кварцевых генераторов;
- низкий уровень фазовых шумов, что требует тщательного выбора структуры гетеродина и оптимизации её по этому параметру.

Различия в требованиях к гетеродинам для связных и радиолокационных устройств:

- в связных устройствах, как правило, задаётся долговременная стабильность частоты (часовая, суточная, годовая...) и маска спектральной плотности мощности фазовых шумов;
- в радиолокационных устройствах задаётся набег фазы на интервале когерентности.

В статье сделана попытка проанализировать требования, способы реализации и полученные результаты по гетеродинам сантиметрового, и, частично, миллиметрового диапазонов длин волн.

Обзор источников колебаний.

Очевидная тенденция последних лет в разработке радиолокаторов – одновременное увеличение интервалов когерентности и повышение частоты выходного сигнала – приводит к ужесточению требований на спектральную плотность мощности фазовых шумов опорного сигнала и на кратковременную стабильность частоты (дисперсии Аллана). Однако требование по увеличению интервалов когерентности не означает снижение требований к стабильности частоты и фазы на малых интервалах когерентности. В настоящее время безальтернативным источником таких высокостабильных опорных колебаний на интервалах когерентности от единиц миллисекунд до десятков секунд является транзисторный автогенератор, стабилизированный кварцевым резонатором [1-4].

Максимальной стабильностью на больших интервалах времени обладают генераторы частотой 2...4 МГц. Однако перенос столь низкой опорной частоты в сантиметровый и миллиметровый диапазоны требует такую высокую кратность умножения частоты, что подъём фазовых шумов на $20\log N$ при умножении в N раз приводит к недопустимой величине фазовых шумов выходного сигнала гетеродина. Например, при частоте кварцевого генератора 2,5 МГц и выходной частоте гетеродина 33 ГГц уровень фазовых шумов при отстройке ± 10 кГц будет минус 70 дБ.

На миллисекундных интервалах времени по стабильности лидируют высокочастотные кварцевые генераторы, стабилизированные нечётными (до 9...11) гармониками кварцевого резонатора. В этом случае подъём фазовых шумов при умножении частоты такого кварцевого генератора существенно меньше из-за меньшего коэффициента умножения. Так, при использовании разработанного одним из авторов статьи генератора на 729 МГц и выходной частоте гетеродина 33 ГГц уровень фазовых шумов при отстройке ± 10 кГц будет минус 117 дБ. Но высокочастотные кварцевые генераторы имеют худшую по сравнению с низкочастотными кратковременную стабильность частоты на интервалах 0,1...10 сек. [1-4] (см. таблицу1).

Известно также, что атомные стандарты частоты как источники опорных колебаний уступают «чистым» кварцевым генераторам на интервалах менее 1 секунды.

По нашему мнению, на данный момент предпочтительным источником колебаний, высокостабильных в широком диапазоне интервалов времени, представляется источник на основе системы ФАПЧ высокочастотного кварцевого генератора, в качестве опоры которого используется сигнал низкочастотного прецизионного кварцевого генератора, например, частотой 2,5 МГц (рис.1), умноженный умножителем частоты высокой кратности (УЧВК). Такой источник способен обеспечить кратковременную стабильность частоты порядка 10^{-13} на интервалах 100 мсек...10 сек (за счёт

низкочастотного КГ) и превосходит по стабильности многие атомные (рубидиевые, цезиевые, водородные) источники опорных колебаний на интервалах 1...100 мсек (за счёт высокочастотного КГ).

Важным является применение аналогового фазового детектора с частотой сравнения, соответствующей частоте высокочастотного кварцевого генератора. Он должен обеспечить непрерывность управляющего сигнала, и, тем самым, устранить дрожание фазы (jitter), свойственное цифровым системам ФАПЧ с низкой частотой сравнения.

В настоящее время существуют следующие способы получения высокостабильного колебания сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн:

- перенос колебания высокочастотного кварцевого генератора в см-мм диапазон с использованием умножителей частоты высокой кратности;
- перенос колебания кварцевого генератора в см-мм диапазон с использованием синтезатора частоты на выходной частоте гетеродина;
- перенос колебания кварцевого генератора в см-мм диапазон с использованием синтезатора частоты в промежуточном диапазоне с последующим его умножением.

Достоинство умножителей частоты в том, что с их помощью можно получить колебание с более низкими фазовыми шумами на малых отстройках от несущей, чем с помощью систем ФАПЧ. При этом, чтобы обеспечить приемлемые технические характеристики умножителей частоты (побочные составляющие спектра, энергопотребление, габариты и вес, стоимость), частота опорного кварцевого генератора должна быть выше 50...70 МГц. Тогда становится возможным применение диодов с накоплением заряда (ДНЗ) и умножение частоты опорного кварцевого генератора в однокаскадном умножителе частоты высокой кратности (УЧВК) до выходной частоты 4...5 ГГц. Существующие высокочастотные фильтры обеспечивают на этих частотах подавление побочных составляющих спектра выходного сигнала более 60 дБ. При необходимости получения сигнала гетеродина на более высоких частотах добавляется транзисторный умножитель частоты (УЧ) кратностью 2, 3 или 4 (рис.2).

Преимущества систем ФАПЧ перед умножителями следующие:

- возможность установки требуемой выходной частоты, не обязательно кратной частоте кварцевого генератора;
- возможность перестройки частоты во время работы, получение сетки частот;
- низкие фазовые шумы на высоких отстройках от несущей;
- возможность использования в качестве опоры высокостабильных низкочастотных генераторов.

Обзор существующей элементной базы микросхем СВЧ синтезаторов частоты показал, что диапазон частот существующих в настоящее время монолитных и гибридных микросхем синтезаторов частоты ограничен сверху 6...8 ГГц, при этом на верхнем краю диапазона фазовые шумы ГУНа и синтезатора в целом оставляют желать лучшего. Поэтому для достижения оптимальной картины фазовых шумов выходного колебания целесообразно использовать систему «синтезатор + умножитель», то есть сначала с помощью системы ФАПЧ создаётся колебание частотой 2...4 ГГц, а потом это колебание умножается до требуемой выходной частоты. В результате сохраняются основные достоинства источников колебаний на основе систем ФАПЧ, а диапазон выходных частот не ограничивается сверху существующей элементной базой синтезаторов с ФАПЧ.

На рис. 3 и рис. 4 приведены сравнительные картины фазовых шумов колебаний частотой 9.5-10 ГГц, полученных с помощью умножителя частоты от опорного кварцевого генератора (КГ) 280 МГц (рис.3, кривая 2), синтезатора частоты Si4133 с последующим умножением частоты на 4 (КГ 30 МГц) (рис.3, кривая 1), расчётная картина фазовых шумов для синтезатора PSA3280C с последующим умножением на 3 с опорой от КГ 25 МГц (рис.4) и с опорой от КГ 280 МГц с делителем частоты (рис.4). У синтезатора Si4133 установлена частота сравнения 125 кГц, выходная частота 2380 МГц. При расчёте характеристик синтезатора PSA3280C выбрана частота сравнения 500 кГц, выходная частота 3280 МГц.

В таблице 2, помимо спектральной плотности мощности фазовых шумов перечисленных источников сигнала, приведена относительная нестабильность частоты их сигнала.

Заключение.

Можно отметить, что использование в гетеродинах систем связи и когерентных радиолокаторов высокочастотных кварцевых генераторов в сочетании с умножителями частоты высокой кратности позволяет снизить уровень фазовых шумов выходного сигнала при небольших отстройках от несущей.

Существующие в настоящее время микросхемы СВЧ синтезаторов частоты целесообразно использовать до частот 3-5 ГГц, дальше повышать частоту транзисторным или диодным умножителем частоты.

Перспективным представляется совместное использование высокочастотных и прецизионных низкочастотных кварцевых генераторов в схеме с ФАПЧ для получения высокостабильных колебаний в широком диапазоне интервалов времени и с низким уровнем фазовых шумов.

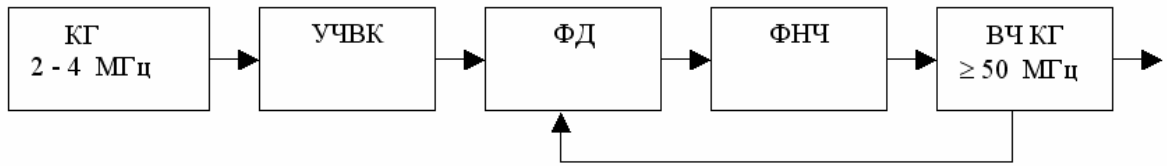


Рис. 1. Источник колебания на основе прецизионного КГ и системы ФАПЧ.

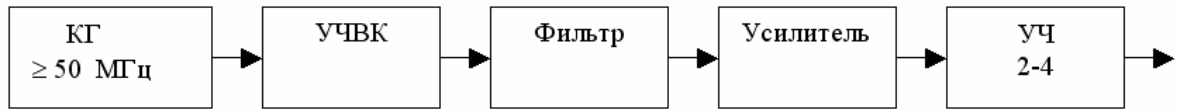


Рис. 2. Получение высокочастотного сигнала путём умножения.

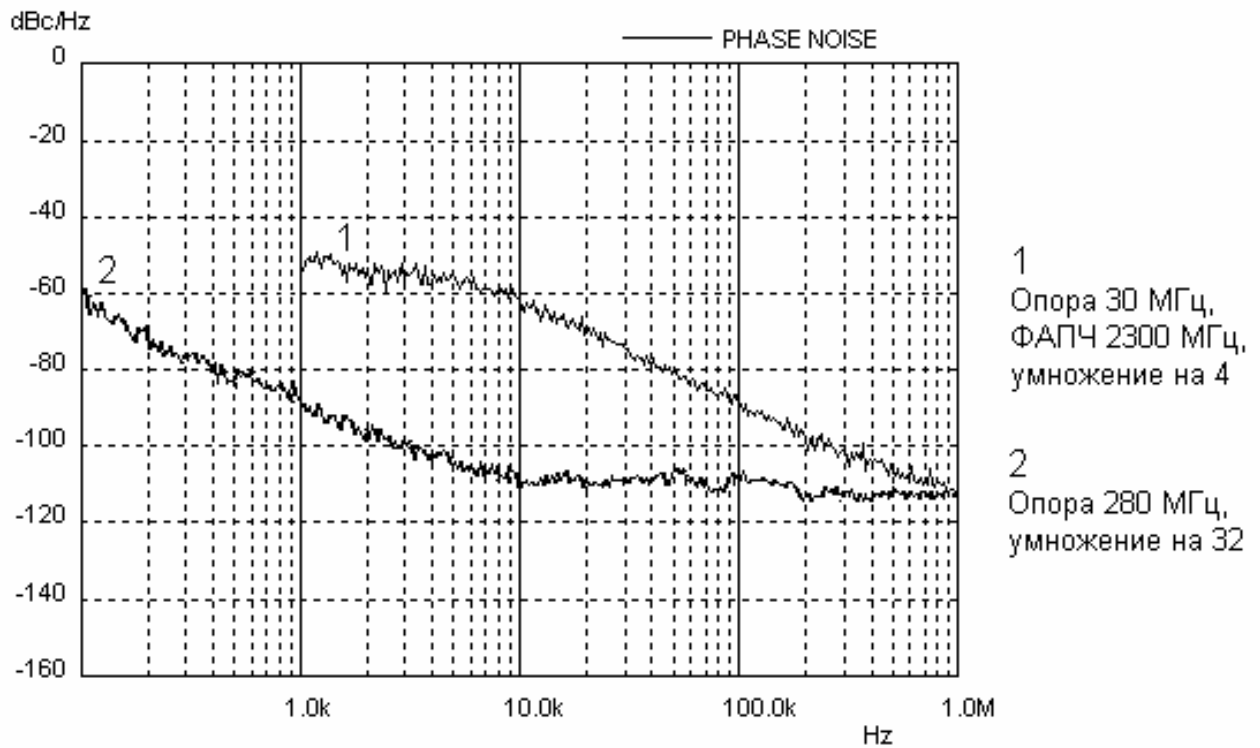


Рис. 3. Экспериментальные кривые фазовых флуктуаций источников колебаний Ка-диапазона.

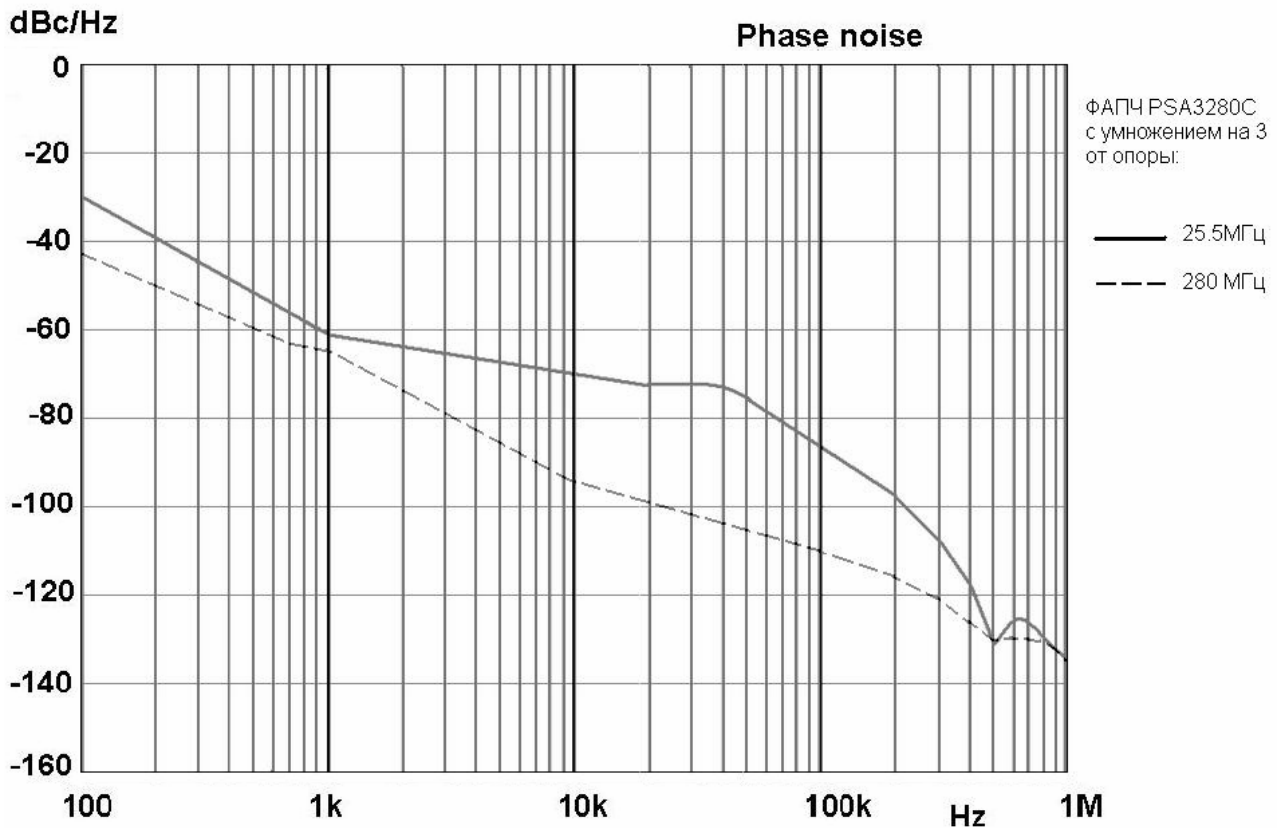


Рис. 4. Расчётные картины фазовых флуктуаций источника сигнала Ка-диапазона с опорой от различных кварцевых генераторов.

Таблица 1. Сравнительные характеристики кварцевых генераторов.

Интервал времени	Частота генератора						
	2,5 МГц	5 МГц	10 МГц	110 МГц	160 МГц	308 МГц	729 МГц
1 сек	2×10^{-13}	5×10^{-13}	$1,2 \times 10^{-12}$				$3,7 \times 10^{-10}$
10 сек	-	-	-				$2,4 \times 10^{-9}$

Таблица 2. Сравнительные характеристики источников колебаний Ка-диапазона.

Источник сигнала	нестабильность частоты за 1 сек	Спектральная плотность мощности фазовых шумов		
		1 кГц	10 кГц	100 кГц
КГ 280 МГц, УЧВК	$9,4 \times 10^{-11}$	-87	-108	-108
КГ 30 МГц, Si-Lab4133, x4	$2,4 \times 10^{-11}$	-50	-60	-88
КГ 25,5 МГц, PSA3280, x3	$2,5 \times 10^{-11}$	-60	-70	-87
КГ 280 МГц, PSA3280, x3	$9,4 \times 10^{-11}$	-65	-95	-115

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.А.Силаев. Формирование спектрально-чистого сигнала в электронике и метрологии.- Метрология и измерительная техника в связи, 1998,№2, стр.16,17
2. S.Gallion, F.Sthal and M.Mourey. Enhanced phase noise model for quartz crystal oscillators.- Proc.IEEE Inf. Frequency Control Symposium, 2002, pp. 627-632.
3. S.V.Anastasyev, A.A.Volkov, Y.L.Vorokhovsky. A new high stability DOСХО. Statistic of the results of frequency stability measurements.- Proc.IEEE Inf. Frequency Control Symposium, 2002, pp. 633-638.
4. E.A.Silaev. Controllable crystal oscillator incorporating provision of high-ratio frequency multiplication.- RU 2207705, 2003.