

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕТЕРОДИНА С ПЕТЛЕЙ ФАПЧ Ku-ДИАПАЗОНА

► А.А.Баронов, В.А.Шадский  
ЗАО "Микро-ВИС"

В работе рассмотрены три варианта построения генератора СВЧ с петлей ФАПЧ Ku-диапазона. Выработаны критерии выбора оптимальной конструкции в зависимости от фазовых шумов ГУН.

## DESIGN FEATURES OF THE LOCAL OSCILLATOR WITH A LOOP PLL KU-BAND

A.A. Baronov, V.A. Shadskiy  
JSC "Micro-WIS"

The paper considers three variants of construction of the microwave oscillator with PLL Ku-band. Developed selection criteria for the optimum design depending on phase noise VCO.

В современных системах спутниковой связи широко используется Ku-диапазон частот. Приемные системы строятся по супергетеродинному принципу. Входящий сигнал преобразуется в L-диапазон для последующей обработки. Одним из критериев качества цифровой связи является вероятность появления битовой ошибки. Влияние гетеродина на величину ошибки можно оценить через среднеквадратическое отклонение фазового шума ( $s_{ФШ}$ ). Для нормального функционирования приемника гетеродин должен обладать высокой стабильностью и низкой спектральной плотностью фазовых шумов. Разные схемы построения гетеродина позволяют получить разные по форме профили спектральной плотности мощности фазовых шумов, но близкие по величине  $s_{ФШ}$ . В работе рассматриваются вопросы проектирования генератора для супергетеродинного приемника Ku-диапазона с выходной частотой 10 ГГц, предложено три варианта построения, проанализированы достоинства и недостатки каждого варианта.

Генераторы с петлей фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), спроектированные на основе современной элементной базы, характеризуются достаточно низким уровнем спектральной плотности фазовых шумов, обладают малыми массогабаритными характеристиками. Типичная схема генератора с петлей ФАПЧ приведена на рис.1.

Принцип функционирования генератора с петлей ФАПЧ. Генератор, управляемый напряжением (ГУН), вырабатывает сигнал СВЧ, близкий к заданной частоте. Для получения требуемой выходной частоты и ее стабилизации используется петля обратной связи. Часть энергии отводится на частотно-фазовый детектор (ЧФД), в котором происходит сравнение с сигналом от опорного генератора (ОГ). В качестве ОГ широко используется кварцевый генератор. Перед ЧФД сигнал от ГУН

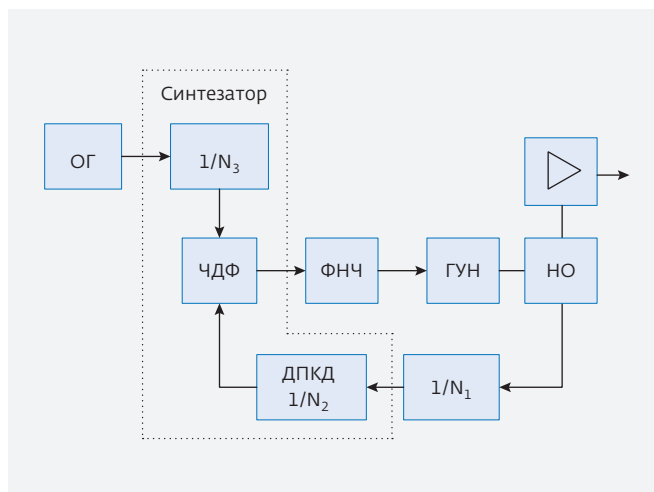


Рис.1. Структурная схема генератора с петлей ФАПЧ:  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  – коэффициенты деления; НО – направленный ответвитель

переносится на более низкие частоты с помощью делителя частоты с фиксированным коэффициентом деления  $N_1$ , а также с помощью делителя с переменным коэффициентом деления (ДПКД)  $N_2$  в составе синтезатора. Делитель с фиксированным коэффициентом деления  $N_1$  может быть отдельной интегральной схемой, или входить в состав либо ГУН, либо синтезатора. Последний вариант характеризуется наименьшим током потребления. В результате сравнения сигналов ЧФД вырабатывает разностное напряжение, которое является управляющим для ГУН. На выходе ЧФД образуется постоянное и переменное напряжение. Для фильтрации переменной составляющей перед управляющим входом ГУН ставят фильтр низких частот (ФНЧ). ФНЧ определяет полосу захвата петли ФАПЧ.

Гетеродин с петлей ФАПЧ представляет собой сложную систему автоматического регулирования с обратной связью, работа которой может быть описана в соответствии с теорией управления [1]:

$$K(p) = G(p) / (1 + G(p) \cdot H), \quad (1)$$

$$G(p) = (K_{\text{ЧФД}} \cdot K_0 \cdot K_{\text{ФНЧ}}) / p, \quad (2)$$

$$H = 1/N, \quad (3)$$

где  $G(p)$  – коэффициент передачи в прямом направлении;  $H$  – коэффициент передачи петли обратной связи;  $p = j \cdot \omega$  – оператор Лапласа;  $K_{\text{ФНЧ}}$  – коэффициент передачи фильтра;  $K_0$  – крутизна перестройки ГУН, Гц/В;  $K_{\text{ЧФД}}$  – крутизна ЧФД, мА/рад,  $N$  – коэффициент деления частоты ГУН.

Относительно полосы захвата все источники шума в соответствии с их передаточными функциями по отношению к выходу системы можно разделить на две группы: внеполосные (ГУН) и внутриполосные источники (ОГ, внешний делитель частоты, ЧФД и делитель частоты в составе синтезатора). Профиль результирующих фазовых шумов системы можно рассчитать исходя из пересчета фазовых шумов отдельных источников к выходу гетеродина с учетом передаточных характеристик и нахождения их среднеквадратического значения [1]:

$$L(f) = 10 \lg \left[ (U_{\text{ОГ}} \cdot G_{\text{ОГ}}(p))^2 + (U_{\text{синт}} \cdot G_{\text{синт}}(p))^2 + (U_{\text{ГУН}} \cdot G_{\text{ГУН}}(p))^2 \right], \quad (4)$$

$$G_{\text{ОГ}}(p) = G(p) / (1 + G(p) \cdot H), \quad (5)$$

$$G_{\text{синт}}(p) = (1/K_{\text{ЧФД}}) \cdot (G(p) / (1 + G(p) \cdot H)), \quad (6)$$

$$G_{\text{ГУН}}(p) = 1 / (1 + G(p) \cdot H), \quad (7)$$

где  $L(f)$  – кривая спектральной плотности результирующих фазовых шумов;  $U_{\text{ОГ}}$ ,  $U_{\text{синт}}$ ,  $U_{\text{ГУН}}$  – шумовые напряжения ОГ, синтезатора и ГУН;  $G_{\text{ОГ}}(p)$ ,  $G_{\text{синт}}(p)$ ,  $G_{\text{ГУН}}(p)$  – передаточные функции для ОГ, синтезатора и ГУН.

На кривой спектральной плотности фазовых шумов (рис.2-1) можно условно выделить три области по частоте отстройки:

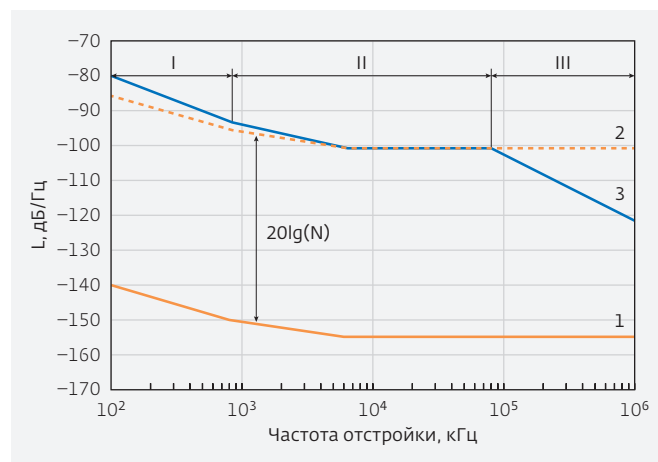
I – область доминирующего влияния преобразованных шумов опорного генератора и фликкер-шумов выходных усилителей,

II – область пересчитанных к выходу системы шумов синтезатора и ОГ,

III – область, определяемая шумами ГУН.

Первые две области определяются внутриполосными источниками шума, а третья – внеполосными.

Источники шума, доминирующие в каждой из областей, могут оказывать существенное влияние на смежные области. Каждая область осуществляет вклад в среднеквадратическое отклонение фазового шума [2-4]. На основе интегрального параметра – среднеквадратического отклонения фазового шума – возможно сравнение конструкций, имеющих разные кривые фазовых шумов. Уменьшение среднеквадратического отклонения фазового шума возможно либо за счет снижения



**Рис.2.** Кривые спектральной плотности фазовых шумов для генератора с петлей ФАПЧ: 1 – фазовые шумы опорного генератора, 2 – пересчитанные к выходной частоте фазовые шумы опорного генератора, 3 – шумы генератора с петлей ФАПЧ

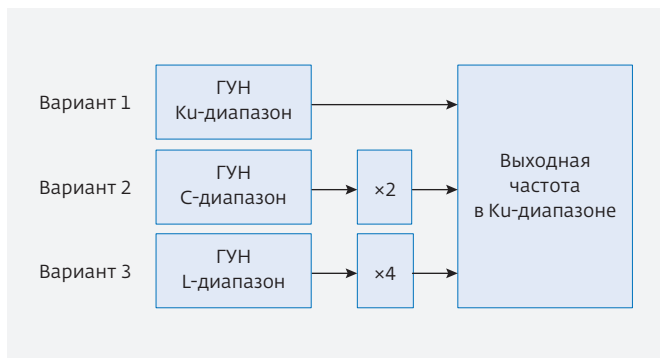


Рис.3. Варианты формирования частоты генератора в Ku-диапазоне

всего уровня шумов, либо за счет уменьшения ширины областей I и II.

Для получения частоты в Ku-диапазоне можно воспользоваться тремя способами формирования выходной частоты (рис.3). Все три варианта базируются на однопетлевой ФАПЧ. Принципиальное отличие заключается в частоте сигнала, сформированного ГУН, и коэффициенте умножения для получения заданной частоты. В работе для формирования опорного сигнала использовались термостатированные кварцевые генераторы фирмы ОАО "Морион" с частотой генерации 25 и 100 МГц.

Критерием оптимальности конструкции в пределах каждого варианта выбрана величина среднеквадратического отклонения фазового шума. При проектировании генераторов ставилось целью достижение близких по величине значений среднеквадратического отклонения фазового шума:  $S_{ФШ1} \approx S_{ФШ2} \approx S_{ФШ3}$ . На рис.4 представлены кривые спектральной плотности мощности фазового шума, соответствующие трем вариантам построения генераторов. Основные характеристики ГУН разных частотных диапазонов сведены в табл.1.

Отличительной особенностью первого варианта является соответствие частоты ГУН выходной частоте генератора. Структурная схема такого генератора совпадает с представленной на рис.1. Конструктивное исполнение ГУН Ku-диапазона – монолитная интегральная схема (МИС). Исходя из существующей выпускаемой номенклатуры можно выделить два варианта исполнения ГУН:

- без встроенного делителя частоты; характерен малый ток потребления, большой фазовый шум при отстройке на 10 и 100 кГц (вариант 1а, табл.1); необходимость использования внешнего делителя (ток потребления не более 90 мА);

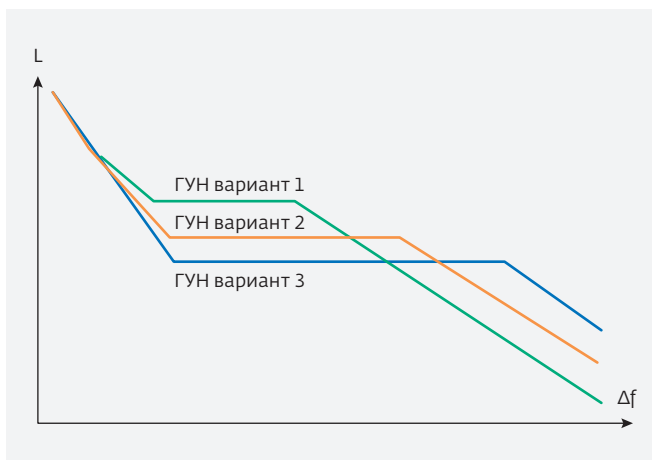


Рис.4. Кривые спектральной плотности мощности фазового шума генераторов

- со встроенным делителем частоты на 2 и 4; характерен большой ток потребления, низкий фазовый шум при отстройке на 100 кГц (вариант 1б, см. таблицу).

Вариант ГУН (1а) имеет преимущество по току потребления, однако существенно уступает по уровню фазовых шумов.

В первом варианте фазовые шумы ГУН при отстройке на 10 кГц накладывают ограничения в выборе полосы захвата петли ФАПЧ. Полоса захвата более 100 кГц позволяет уменьшить влияние ГУН в ближней зоне (кривая 1, рис.4). На выходе генератора фазовые шумы при отстройке 100 кГц будут определяться внутрисполосными источниками, то есть преимущественно синтезатором. В системе ФАПЧ попытка устранить влияния высоких шумов ГУН при отстройке на 10 кГц приводит к невозможности воспользоваться преимуществом низких фазовых шумов ГУН при отстройке на 100 кГц. Генератор спроектирован с использованием синтезатора с уровнем нормализованных фазовых шумов (-233) дБ/Гц. Для достижения среднеквадратического отклонения фазового шума, сравнимого со значениями генераторов варианта 2 и 3, выбран более высокочастотный ОГ с меньшим уровнем фазовых шумов, большим током потребления и большими массогабаритными характеристиками. Среднеквадратическое отклонение фазового шума гетеродина не превышает 0,6°.

К достоинствам данной схемы можно отнести относительно простую структуру, к недостаткам – высокое энергопотребление. Внешний вид генератора приведен на рис.5.

Характеристики ГУН

Вар. №	Наименование	Вариант исполнения	Ток потребления при $U_{пит}=5 В, mA$	Уровень спектральной плотности фазовых шумов при отстройке, дБ/Гц	
				10 кГц	100 кГц
1а	ГУН Ку-диапазона	Полупроводниковая МИС без делителя частоты	270	-63	-90
1б	ГУН Ку-диапазона	Полупроводниковая МИС с делителем частоты	60	-85	-115
2	ГУН С-диапазона	Микросборка	40	-103	-126
3	ГУН L-диапазона	Микросборка	30	-116	-136

Второй и третий вариант построения генератора Ку-диапазона подразумевают использование ГУН С-диапазона и L-диапазона. ГУН этих диапазонов производятся в полупроводниковом исполнении и в виде микросборок. Преимущество полупроводниковых ГУН - в малых габаритах, а микросборок ГУН - в малом токе потребления и низком уровне фазовых шумов. Выполняются такие ГУН на коаксиальном резонаторе типа КРП 4,0×4,5 (ООО "Керамика"). Внешний вид второго варианта приведен на рис.6, варианта 3 - на рис.7. Фазовые шумы и ток потребления для ГУН С-диапазона и L-диапазона приведены в таблице. Уровень фазовых шумов при транспонировании частоты ГУН в Ку-диапазон можно рассчитать по формуле [1]:

$$L_{гетер}(f) = L_{ФАПЧ}(f) + 20 \cdot (N), \tag{8}$$

где  $L_{гетер}(f)$  - кривая спектральной плотности фазовых шумов гетеродина;  $L_{ФАПЧ}(f)$  - кривая спектральной плотности фазовых шумов ФАПЧ без умножения;  $N$  - коэффициент умножения.

По формулам 7 и 8 пересчитываем фазовые шумы ГУН из таблицы к выходу гетеродина. ГУН L-диапазона имеет преимущество над остальными при отстройке на 100 кГц. Выигрыш варьируется от 4 до 34 дБ.

Низкие фазовые шумы ГУН в третьем варианте позволяют проектировать генератор посредством формирования третьей области (рис.2). Полоса захвата рассчитывается узкой, менее 10 кГц



Рис.5. Генератор Ку-диапазона на основе ГУН Ку-диапазона

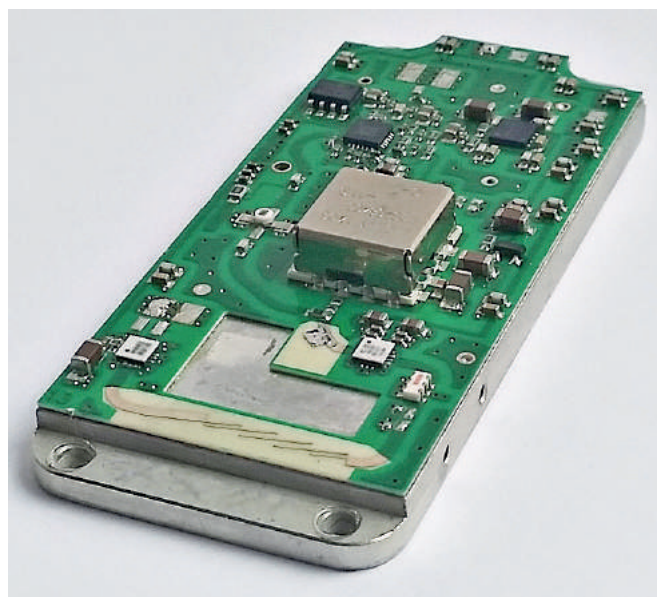
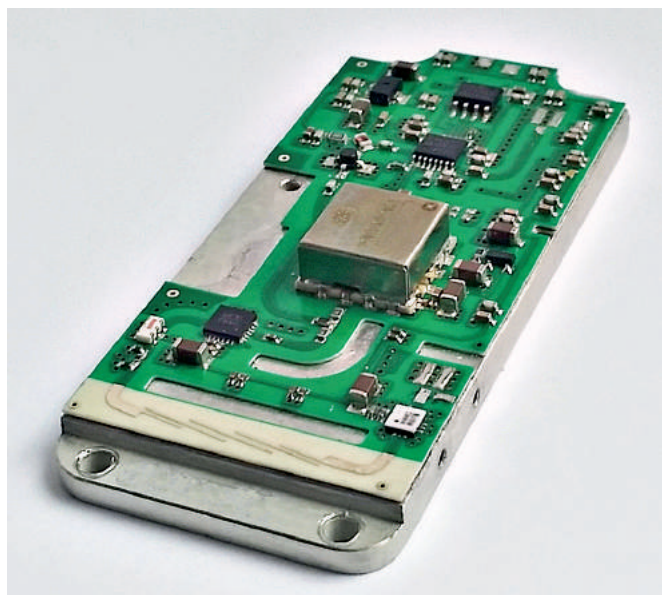


Рис.6. Генератор Ку-диапазона на основе ГУН С-диапазона



**Рис.7.** Генератор Кв-диапазона на основе ГУН L-диапазона

(кривая 3, рис.4). Это ведет к снижению требований к фазовым шумам синтезатора и опорного генератора. На рис.6 реализован генератор, в состав которого входит синтезатор частоты с нормализованными фазовыми шумами (-223) дБ/Гц. Среднеквадратическое отклонение фазового шума гетеродина не превышает  $0,5^\circ$ .

Во втором варианте был выбран синтезатор с нормализованными фазовыми шумами (-233) дБ/Гц. Рассчитана более широкая полоса захвата (кривая 2, рис.4). Среднеквадратическое отклонение фазового шума гетеродина не превышает  $0,6^\circ$ .

К недостаткам второго и третьего варианта следует отнести наличие на выходе гетеродина гармоник кратных частоте ГУН и не кратных выходной частоте гетеродина. Присутствие нечетной гармоники, кратной ГУН L-диапазона приводит к переносу паразитного сигнала в область промежуточных частот или близкую к ней. Формируется помеха. Избежать формирования мощной помехи, влияющей на работу демодулятора, возможно, применив нескольких цепей фильтрации.

## ВЫВОДЫ

1. Выбор ГУН с меньшими фазовыми шумами способствует уменьшению энергопотребления, позволяет использовать более простые узлы

ФАПЧ и, как следствие, уменьшать себестоимость изделия. При этом массогабаритные характеристики ГУН принимают второстепенное значение.

2. В зависимости от выбранного ГУН рассчитывается оптимальная полоса захвата, при этом задача сводится к достижению среднеквадратического отклонения фазового шума, удовлетворяющего требованиям надежности передачи информации с данным видом модуляции.
3. Проектирование генераторов в Кв-диапазоне с частотой ГУН, совпадающей с выходной частотой гетеродина и низкими фазовыми шумами, сопряжено с высоким током потребления.
4. Ограничение требований при разработке гетеродина требованиями исключительно к форме кривой профиля фазовых шумов может привести к созданию конструкции с увеличенной себестоимостью, повышенным энергопотреблением и увеличенными массогабаритными характеристиками. Более гибким требованием к гетеродинам является среднеквадратическое отклонение фазового шума.

Авторы считают, что в данной работе новым является положение об использовании величины среднеквадратического отклонения фазового шума в качестве критерия оптимальности разработанной конструкции гетеродина и в качестве обязательного требования к гетеродину взамен или совместно с традиционным требованием к профилю фазовых шумов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Banerjee D.** PLL Performance, Simulation and Design, Fourth Edition. - Indianapolis, Indiana: Dog Ear Publishing LLC, 2006. P. 344.
2. **Pelliccio J.R., Bachmann H., Myers B.W.** Phase Noise Effects on OFDM Wireless LAN Performance // APPLIED MICROWAVE & WIRELESS, 2000, vol. 13, № 7. PP. 68-80.
3. **Grebenkemper C.J.** Local Oscillator Phase Noise and its Effect on Receiver Performance. Technical Note. Vol. 8, № 6, November/December. Watkins-Johnson Company. 2001. [Электронный документ] - URL: <http://citeserx.ist.psu.edu>. Дата обращения: 20.12.13
4. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. С. 1104.