

И. И. КРИВАЛЬ, А. И. СКРИПНЮК,  
В. А. ПРОЦЕНКО, А. В. МАРЬЕНКО

Украина, г. Киев, ОАО «Меридиан» им. С. П. Королева,  
E-mail: Feedback@meridian.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
10.12.2010 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО  
(НПП «Сатурн», г. Киев)

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕКОТОРЫХ УЗЛОВ ЧАСТОТОМЕРОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА

*Приведены рекомендации по выбору оптимальных параметров таких узлов частотомеров СВЧ-диапазона, как преобразователь частоты, синтезатор частоты, усилитель промежуточной частоты, позволяющих увеличить чувствительность приборов и точность измерений.*

В [1] авторами был рассмотрен общий принцип построения и работы СВЧ-частотомеров УА ЧЗ-79М и УА ЧЗ-101, однако не были уточнены требования, предъявляемые к узлам частотомера. Для специалистов, работающих в области проектирования частотомеров СВЧ, очень важны и полезны сведения, которые касаются оптимальных параметров таких узлов частотомера, как преобразователь частоты, синтезатор частоты, усилитель промежуточной частоты (УПЧ). От выбора этих параметров зависит решение основной задачи, которая стоит перед разработчиками СВЧ-частотомеров — обеспечение высокоточных измерений частоты в автоматическом режиме при работе как с синусоидальными, так и с радиоимпульсными сигналами. Кроме того, от них напрямую зависит диапазон измеряемых частот, точность измерений, алгоритм работы частотомера и, наконец, его габариты, масса и надежность.

Работа частотомеров в СВЧ-диапазоне происходит с обязательным преобразованием частот входного сигнала в диапазон более низких промежуточных частот [2]. На этих частотах происходит дальнейшая обработка сигнала и его измерение.

В последнее время в Украине и за рубежом в качестве преобразователей частоты используют не только гармонические сместители, но и стробоскопические преобразователи частоты (семплеры), работающие в диапазоне частот до 170 ГГц [3].

Эти устройства производят преобразование частот входного сигнала за счет стробирования его на гармониках сигнала от перестраиваемого синтезатора частоты.

Основными узлами СВЧ-частотомеров являются стробоскопический преобразователь частоты, перестраиваемый синтезатор частоты, УПЧ, микроконтроллер и др., описанные в [1].

Результатом стробоскопического преобразования является промежуточная частота  $f_{пч}$ , которая связана с измеряемым сигналом  $f_{изм}$  выражением

$$f_{изм} = Nf_c \pm f_{пч} \quad (1)$$

где  $N$  — номер гармоники частоты синтезатора  $f_c$ , на которой осуществляется преобразование. Знак « $\pm$ » означает, что преобразование СВЧ-сигнала происходит как на прямом, так и на «зеркальном» каналах. На зеркальном канале при увеличении частоты синтезатора от первоначального значения промежуточная частота увеличивается, а на прямом — уменьшается.

Если преобразование осуществляется на зеркальном канале, то измеряемые частоты будут определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} f_{изм \min(3)N} &= Nf_{c \min} - f_{пч \max}, \\ f_{изм \max(3)N} &= Nf_{c \max} - f_{пч \min}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f_{изм \min(3)N}$ ,  $f_{изм \max(3)N}$  — границы диапазона измеряемых частот на  $N$ -й гармонике при работе на зеркальном канале;  $f_{пч \max}$ ,  $f_{пч \min}$  — максимальная и минимальная частоты, полученные в процессе преобразования и прошедшие через полосу УПЧ;  $f_{c \min}$ ,  $f_{c \max}$  — минимальная и максимальная частоты синтезатора, в границах которых происходит перестройка его частоты.

Если преобразование происходит на прямом канале, то измеряемые частоты будут определяться как

$$\begin{aligned} f_{изм \min(\Pi)N} &= Nf_{c \min} + f_{пч \min}, \\ f_{изм \max(\Pi)N} &= Nf_{c \max} + f_{пч \max}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $f_{изм \min(\Pi)N}$ ,  $f_{изм \max(\Pi)N}$  — границы диапазона измеряемых частот на  $N$ -й гармонике при работе на прямом канале.

Частоты синтезатора и полоса УПЧ выбраны правильно в том случае, если выполняется условие

$$f_{изм \max(3)N} \geq f_{изм \min(\Pi)N} \quad (4)$$

Кроме того, должно осуществляться перекрытие измеряемых частот при работе на 1-й, 2-й, а также последующих гармониках, т. е. должны отсутствовать так называемые мертвые зоны, где измерение невозможно, а значит, должно выполняться условие

$$f_{изм \max(\Pi)N} \geq f_{изм \min(3)N+1} \quad (5)$$

Номер гармоники  $N$  определяется по следующему алгоритму.

По команде микроконтроллера происходит пошаговая перестройка частоты синтезатора с максимального значения до минимального, т. е. с  $f_{c \max}$  до  $f_{c \min}$ , до появления на выходе УПЧ сигнала промежуточной частоты  $f_{пч1}$ . После этого перестройка синтезатора останавливается и измеряется его частота  $f_{c1}$  и промежуточная частота  $f_{пч1}$ . Затем частота синтезатора смещается на величину  $\Delta f_c$ , и снова производится вычисление и запоминание частоты синтезатора  $f_{c2} = f_{c1} + \Delta f_c$  и соответствующее ей значение промежуточной частоты  $f_{пч2}$ .

Номер гармоники  $N$  определяют как

$$N = |f_{пч2} - f_{пч1}| / |f_{c2} - f_{c1}|. \quad (6)$$

### Требования, предъявляемые к стробоскопическому преобразователю частоты

Стробоскопический преобразователь частоты (далее — преобразователь) должен выполнять свою главную задачу — преобразовывать частоту входного измеряемого сигнала. Это преобразование осуществляется на гармониках частот синтезатора. Основными параметрами преобразователя является диапазон преобразуемых частот и коэффициент преобразования, который должен обеспечивать на его выходе достаточный уровень преобразованного сигнала.

В частотомерах УА ЧЗ-79М и УА ЧЗ-101 используются преобразователи собственного изготовления. Так, в диапазоне измеряемых частот от 200 МГц до 18 ГГц используется преобразователь в микрополосковом исполнении с коаксиальным входом. Он обеспечивает коэффициент преобразования  $-45 \dots -50$  дБ в полосе преобразованных частот от 40 до 130 МГц, на частотах синтезатора в диапазоне от 329 до 470 МГц.

В диапазоне измеряемых частот от 18 до 40 ГГц используются преобразователи с волноводным входом. Они обеспечивают коэффициент преобразования  $-50$  дБ в полосе частот от 40 до 130 МГц. Синтезатор частоты при этом перестраивается в диапазоне от 458 до 470 МГц с шагом 200 кГц.

### Выбор оптимальных параметров синтезатора частоты

Выбор диапазона перестройки частоты синтезатора обусловлен, в первую очередь, номерами гармоник, на которых будет происходить преобразование входного измеряемого сигнала, а они, в свою очередь, зависят от его частоты — чем выше измеряемая частота, тем более высокими будут гармоники.

Известно, что с ростом номера гармоники уровень преобразованного сигнала падает по экспоненциальному закону. С другой стороны, более высокочастотный синтезатор труднее реализовать практически. Поэтому идут на компромиссное решение. Это можно показать на примере.

Допустим, необходимо измерить частоту 40 ГГц.

Если максимальная частота синтезатора, например, 1000 МГц, то максимальный номер гармоники, на которой происходит преобразование частоты, будет

$$N_{\max} = \frac{40 \cdot 10^9 \text{ Гц}}{1 \cdot 10^9 \text{ Гц}} = 40.$$

Технически реализовать такой синтезатор довольно сложно, поэтому необходимо понижать его частоту с компромиссным выбором оптимального номера гармоники.

Так, в частотомерах УА ЧЗ-79М и УА ЧЗ-101 верхняя частота синтезатора равна 470 МГц. Тогда на частоте 40 ГГц максимальный номер гармоники будет

$$N_{\max} = \frac{40 \cdot 10^9 \text{ Гц}}{470 \cdot 10^6 \text{ Гц}} \approx 86.$$

Стробоскопический преобразователь частоты, который используется в частотомере, на гармониках с номерами не выше 86 обеспечивает достаточный для работы уровень преобразованного сигнала.

Минимальная частота синтезатора  $f_{c \min}$ , соответствующая условиям измерения минимальной частоты сигнала  $f_{изм \min}$ , вычисляется из выражения

$$f_{изм \min} = N f_{c \min} - f_{пч \max},$$

где  $f_{изм \min}$  — минимально возможная измеряемая частота сигнала;  $f_{пч \max}$  — максимальная промежуточная частота полосы пропускания УПЧ.

Тогда

$$f_{c \min} = (f_{изм \min} + f_{пч \max}) / N. \quad (7)$$

Так как минимальная частота измеряется на первой гармонике, т. е.  $N=1$ , получим

$$f_{c \min} = f_{изм \min} + f_{пч \max}. \quad (8)$$

В частотомерах УА ЧЗ-79М и УА ЧЗ-101 минимальная частота измерения составляет 199 МГц,  $f_{пч \max} = 130$  МГц, а значит  $f_{c \min} = 329$  МГц.

Особое внимание необходимо уделить выбору величины приращения частоты синтезатора  $\Delta f_c$  при определении номера гармоники  $N$  по формуле (6). Ее следует выбирать из соображений компромисса между однозначным определением номера гармоники  $N$  при измерении частоты с большой девиацией и измерением несущей частоты коротких радиопульсных сигналов наносекундной длительности. Если  $\Delta f_c$  будет меньше девиации измеряемой частоты, то результат измерения может быть ложным из-за неоднозначного определения номера гармоники  $N$ .

При измерении несущей частоты радиопульсных сигналов наносекундной длительности абсолютная погрешность измерения составляет 300—400 кГц, частоты  $f_{пч1}$ ,  $f_{пч2}$  в формуле (6) будут измерены с этой погрешностью, что приведет к неоднозначности в определении номера гармоники  $N$ . Поэтому величина  $\Delta f_c$  должна быть как можно больше.

С другой стороны, выбор величины  $\Delta f_c$  ограничен полосой пропускания УПЧ. Поэтому из соображений оптимизации конструкции в частотомере УА ЧЗ-79М величина  $\Delta f_c$  выбрана равной 1 МГц, в частотомере УА ЧЗ-101 в диапазоне частоты от 18 до 25 ГГц  $\Delta f_c = 800$  кГц, а в диапазоне от 25 до 40 ГГц  $\Delta f_c = 400$  кГц.

Величина разрешения по частоте (дискретный шаг перестройки частоты синтезатора) выбирается из условия достаточной фильтрации частоты дискрета, оптимальной полосы УПЧ и выбранного максимального номера гармоники.

В частотомерах UA ЧЗ-79М и UA ЧЗ-101 шаг перестройки частоты синтезатора выбран равным 200 кГц. Эта частота на фоне высоких частот синтезатора легко отфильтровывается, и обеспечивается уровень побочных составляющих в сигнале синтезатора порядка 65—70 дБ.

### Выбор оптимальной полосы УПЧ

Полоса частот УПЧ выбирается с учетом нескольких условий.

Верхняя частота полосы пропускания  $f_{\text{чп max}}$  не должна быть больше максимально возможной частоты преобразования. При стробоскопическом преобразовании максимальная преобразованная промежуточная частота определяется как

$$f_{\text{пч max}} \leq \frac{f_{\text{с max}}}{2}. \quad (9)$$

В частотомерах UA ЧЗ-79М и UA ЧЗ-101 верхняя частота синтезатора  $f_{\text{с max}}$  выбрана равной 470 МГц. Тогда

$$f_{\text{пч max}} = \frac{470 \text{ МГц}}{2} = 235 \text{ МГц}.$$

Как правило, на близких к максимальным промежуточных частотах не работают, т. к. с ростом  $f_{\text{пч}}$  коэффициент преобразования и отношение сигнал/шум падают. Поэтому из диапазона преобразованных промежуточных частот «вырезают» определенную полосу — от  $f_{\text{пч min}}$  до  $f_{\text{пч max}}$ .

Допустим, при измерении входной частоты 18 ГГц в момент определения номера гармоники  $N$  по формуле (6) первая промежуточная частота  $f_{\text{пч1}}$  находится в центре полосы пропускания. Если преобразование частоты произойдет в районе 470 МГц, то

$$N_{\text{max}} = \frac{18 \cdot 10^9 \text{ Гц}}{470 \cdot 10^6 \text{ Гц}} \approx 39.$$

Если значение  $N_{\text{max}}$  взять с запасом, например,  $N'_{\text{max}} = 45$ , то при смещении частоты синтезатора на  $\pm 1$  МГц при определении номера гармоники  $N$  значение второй промежуточной частоты будет равно

$$f_{\text{пч2}} = N'_{\text{max}} \Delta f_{\text{с}} = 45 \cdot 1 \text{ МГц} = 45 \text{ МГц}.$$

При этом ширина полосы пропускания УПЧ должна составлять  $\Pi = 45 \text{ МГц} \cdot 2 = 90 \text{ МГц}$ .

С другой стороны, при измерении несущей частоты радиоимпульсных сигналов наносекундной длительности, допустим  $\tau_{\text{и}} \geq 300 \text{ нс}$ , необходимо, чтобы в радиоимпульсе длительностью 300 нс поместилось не менее десяти периодов промежуточной преобразованной частоты. В противном случае несущая частота будет измерена с большой погрешностью (до 400 кГц по абсолютной величине) и увеличится время измерения.

Если  $f_{\text{пч min}} = 40 \text{ МГц}$ , то период преобразованной несущей частоты составит

$$T_{\text{пч min}} = \frac{1}{40 \cdot 10^6 \text{ Гц}} = 25 \text{ нс}.$$

При этом минимальное количество преобразованных периодов будет равно

$$n = \frac{300 \text{ нс}}{25 \text{ нс}} = 12.$$

Это означает, что в преобразованном радиоимпульсе длительностью 300 нс будет помещаться 12 периодов преобразованной промежуточной частоты 40 МГц, что вполне приемлемо.

И, наконец, известно, что чем шире полоса пропускания, тем меньшим на выходе УПЧ будет отношение сигнал/шум, которое в итоге может стать ниже допустимого порога.

Исходя из всех перечисленных ограничений в частотомерах UA ЧЗ-79М и UA ЧЗ-101 полоса УПЧ выбрана оптимальной — от 40 до 130 МГц.

Таким образом, при измерении входной частоты в диапазоне от 0,2 до 18 ГГц при диапазоне перестройки частоты синтезатора от 329 до 470 МГц и смещении частоты синтезатора  $\Delta f_{\text{с}} = 1 \text{ МГц}$  при определении номера гармоники максимальное изменение промежуточной частоты будет составлять не более  $\pm 45 \text{ МГц}$ . Поэтому промежуточная частота  $f_{\text{пч2}}$  в формуле (6) не будет при этом выходить за пределы полосы пропускания.

Для диапазона частот выше 18 ГГц в частотомере UA ЧЗ-101 во избежание выхода промежуточной частоты за пределы полосы пропускания уменьшена величина смещения частоты синтезатора  $\Delta f_{\text{с}}$ . Так, в диапазоне частот от 18 до 25 ГГц  $\Delta f_{\text{с}} = 800 \text{ кГц}$  и максимальный номер гармоники здесь не превышает 54. В диапазоне частот от 25 до 40 ГГц  $\Delta f_{\text{с}} = 400 \text{ кГц}$  при максимальном номере гармоники 86.

В первом случае изменение промежуточной частоты будет равно

$$f_{\text{пч2}} = 0,8 \text{ МГц} \cdot 54 = 44 \text{ МГц},$$

а во втором

$$f_{\text{пч2}} = 0,4 \text{ МГц} \cdot 86 = 34,4 \text{ МГц},$$

что меньше 45 МГц в обоих случаях.

Наконец, когда основные параметры узлов выбраны, целесообразно проверить выполнение требований, изложенных в формулах (2) и (3).

При работе на первой гармонике ( $N=1$ ):

$$f_{\text{изм min}(3)} = 199 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм max}(3)} = 430 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм min}(\Pi)} = 369 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм max}(\Pi)} = 600 \text{ МГц}.$$

При работе на второй гармонике ( $N=2$ ):

$$f_{\text{изм min}(3)} = 528 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм max}(3)} = 900 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм min}(\Pi)} = 698 \text{ МГц};$$

$$f_{\text{изм max}(\Pi)} = 1070 \text{ МГц}.$$

Проведенная проверка показывает, что при работе на первой гармонике прямого и зеркального каналов возможно измерение входной частоты в диапазоне от 199 до 600 МГц без «мертвых зон», при этом выполняется условие (4), т. е.  $430 \text{ МГц} > 369 \text{ МГц}$ . При работе на второй гармонике возможно измерение частоты в диапазоне от 528 до 1070 МГц. При этом выполняется условие (5), т. е.  $600 \text{ МГц} > 528 \text{ МГц}$ .

В целом, диапазон измерения входных частот на первой и второй гармониках будет находиться в пределах от 200 до 1070 МГц. На следующих гармониках проверку производить не обязательно, если перекрытие по частоте осуществляется на 1-й и 2-й гармониках.

#### Алгоритм измерения

Рассмотрим алгоритм измерения частоты в диапазоне от 0,2 до 18 ГГц.

При введении прибора в режим измерения осуществляется перестройка частоты синтезатора  $f_c$  сверху вниз, т. е. с частоты 470 до 329 МГц. После нахождения первой промежуточной частоты  $f_{пч1}$  происходит остановка синтезатора и измеряются  $f_{пч1}$  и  $f_{c1}$ .

По команде микроконтроллера частота синтезатора смещается на  $\Delta f_c = \pm 1 \text{ МГц}$ , после чего находят значение второй промежуточной частоты  $f_{пч2}$  и частоты синтезатора  $f_{c2} = f_{c1} \pm 1 \text{ МГц}$ .

По формуле (6) определяется номер гармоники  $N1$ . Затем частота синтезатора возвращается обратно, и снова вычисляется номер гармоники  $N2$ . Процедура повторяется пятикратно, измеренные значения гармоник округляются и сравниваются. При достижении их равенства номер гармоники заносится в память микроконтроллера, в котором по формуле (1) вычисляется искомая частота  $f_{изм}$ . Результат измерения высвечивается на индикаторе.

В диапазоне частот от 18 до 25 ГГц и от 25 до 40 ГГц измерения происходят аналогично, но с разным смещением частоты: в первом диапазоне  $\Delta f_c = 0,8 \text{ МГц}$ , а во втором —  $\Delta f_c = 0,4 \text{ МГц}$ .

Процесс измерения несущей частоты радиоимпульсных сигналов аналогичен вышеописанному.

\*\*\*

Таким образом, выбор оптимальных параметров таких узлов СВЧ-частотомеров, как стробоскопический преобразователь частоты, синтезатор частоты и УПЧ, позволил создать высокочувствительные частотомеры, которые работают в очень широком диапазоне — от 200 МГц до 40 ГГц и отличаются надежностью измерений.

Удалось также автоматизировать процесс измерения частоты и аппаратно совместить процессы измерения как несущей частоты радиоимпульсных сигналов, так и частоты синусоидальных сигналов.

Используя приведенные рекомендации по выбору оптимальных параметров узлов частотомера, специалисты ОАО «Меридиан» им. С. П. Королева начали модернизацию частотомера УА ЧЗ-101. В модернизированном частотомере вместо волноводных стробоскопических преобразователей частоты будет использован широкополосный стробоскопический сместитель в коаксиальном исполнении. Это позволит удешевить прибор, сделать его более удобным в эксплуатации и расширить сферы его применения.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ.

1. Криваль И. И., Скрипнюк А. И., Проценко В. А., Марьенко А. В. Малогабаритные цифровые частотомеры сверхвысокочастотного диапазона // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 5. — С. 54—57. [Krival' I. I., Skripnyuk A. I., Protsenko V. A., Mar'enko A. V. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2009. N 5. P. 54]
2. Аппаратура для частотных и временных измерений / Под ред. А. П. Горшкова. — М.: Сов. радио, 1971. [Pod red. A. P. Gorshkova. Moscow. Sov. radio, 1971]
3. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства. Каталог. — Нижний Новгород: Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц», 2010. [Katalog. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii nauchnoissledovatel'skii priborostroitel'nii institut «Kvarts», 2010]



### 14-я специализированная выставка

25—27 октября 2011 года

ПВЦ "Радмир Экспохолл"

(Украина, г. Харьков, ул. Академика Павлова, 271)

#### Тематика выставки

- Контрольно-измерительные приборы для электрических цепей и сетей.
- Электрическое, электромеханическое, электрофизическое, электрохимическое измерительное оборудование для измерения не электрических параметров.
- Электрические и электронные контрольно-измерительные приборы для лабораторных и ядерных исследований.
- Электронное контрольно-измерительное вибрационное и акустическое оборудование.
- Магнитная и электромагнитная измерительная аппаратура.
- Линейно-угловые измерения, приборы для измерения перемещений, геодезическая, топографическая измерительная аппаратура.
- Оптические измерительные приборы.
- Приборы для измерения и контроля давления.
- Счетчики электроэнергии, воды, газа, тепла.
- Оборудование для измерения и контроля объема, уровня и расхода жидкостных и газовых сред.
- Приборы и датчики для измерения веса.
- Приборы для контроля технологических процессов.
- Приборы для измерения времени и частоты.
- Приборы для температурных измерений.