УДК 537.867:621.376

В. П. КОМОЛОВ, В. А. РОЗНЯТОВСКИЙ

ДИСКРЕТИЗАЦИЯ РАДИОСИГНАЛОВ В ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ КОНТУРЕ С ВИДЕОИМПУЛЬСНОЙ НАКАЧКОЙ

Дискретизация сигналов имеет важное значение в системах передачи аналоговой информации методами импульсной модуляции, при использовании цифровой обработки аналоговых сигналов, при временном уплотнении каналов связи.

Дискретизацией сигнала является замена непрерывного сигнала последовательностью его значений (отсчетов), следующих обычно через одинаковые интервалы времени. Отсчеты представляют собой видеоимпульсы, амплитуда которых равна значениям сигнала в моменты отсчетов. Согласно теореме В. А. Котельникова такая последовательность видеоимпульсов будет однозначно определять дискретизируемый сигнал, если частота следования импульсов равна удвоенной наивысшей частотной составляющей сигнала [1].

В качестве дискретизирующих (стробирующих) устройств используются электронные ключи, основным недостатком которых является высокий порог срабатывания. Это приводит к необходимости в предварительном усилении дискретизируемого сигнала. В некоторых случаях приходится осуществлять дискретизацию низкочастотной составляющей высокочастотного сигнала, например огибающей АМ сигнала (модулирующего напряжения). В этом случае частота дискретизации определяется не только относительно максимальной спектральной составляющей модулирующего сигнала, но и относительно несущей частоты. Кроме того, длительность стробирующего импульса должна быть меньше половины периода колебаний несущей, иначе необходимо предварительно демодулировать радиосигнал, а затем осуществлять дискретизацию модулирующего напряжения [2].

В качестве устройства, позволяющего осуществлять эффективную дискретизацию огибающей АМ сигнала в широком динамическом диапазоне, может быть использован параметрический контур с видеоимпульсной накачкой, выполняющий параметрическое стробирование [3].

Параметрический контур (ПК) с видеоимпульсной накачкой представляет собой LC-контур, один из энергоемких параметров которого скачкообразно меняется во времени. При скачкообразном изменении управляющего напряжения (накачки) от U_1 до U_2 происходит «переключение» величины реактивного параметра, например, емкости, от $C_{макс}$ до $C_{мин}$, а следовательно, и «переключение» собственной частоты контура от $f_{мин}=1/2\pi\sqrt{LC_{макс}}$ до $f_{макс}=1/2\pi\sqrt{LC_{мин}}$. Управляющее напряжение (накачка) представляет собой последовательность видеоимпульсов, фронт которых осуществляет переход ПК с нижней частоты $f_{мин}$ на верхнюю $f_{макс}$, а спад — обратный переход. Высокая добротность контура и большой коэффициент перекрытия емкости

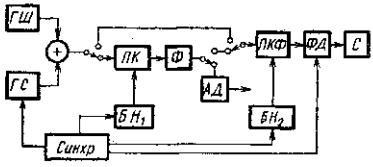
$K=C_{макс}/C_{мин}$ позволяют получить большое изменение собственной частоты контура, при этом полосы прозрачности контура значительно разнесены, что весьма существенно для частотного разделения сигналов. Находясь на одной из собственных частот, контур сохраняет линейные свойства и может принимать радиосигнал. Прием радиосигнала целесообразно вести на нижней частоте $f_{мин}$, так как переход на верхнюю частоту сопровождается внесением в контур энергии накачки, т. е. импульсным параметрическим усилением [3, 4]. При периодическом переходе с нижней частоты, на которой принимается сигнал, на верхнюю вынужденные колебания в контуре, наведенные радиосигналом, преобразуются в свободные колебания на верхней частоте; последние представляют, таким образом, выборки, содержащие информацию об амплитуде радиосигнала в момент перехода [3]. По окончании выборки (при обратном переходе на нижнюю частоту) осуществляется импульсное параметрическое гашение собственных колебаний [3], однако гашение не является полным. Из контура изымается только та часть энергии, которая была внесена накачкой. Оставшиеся после гашения свободные колебания на нижней частоте являются переходной помехой, которая взаимодействует с принимаемым сигналом. В зависимости от величины разности фаз переходной помехи и несущей принимаемого сигнала $\Delta\varphi$ выделяются три характерных режима работы ПК: синфазный ($\Delta\varphi=0$), квадратурный ($\Delta\varphi=\pm\pi/2$) и противофазный ($\Delta\varphi=\pm\pi$). Выбор режима работы ПК осуществляется заданием определенной длительности видеоимпульса накачки $\tau_и$ [3]. При стробировании АМ-сигнала целесообразно использовать синфазный режим, при котором колебания переходной помехи и сигнала складываются, образуя коррелированные выборки. Режим некоррелированных выборок (квадратурный) может быть использован при стробировании ФМ-радиосигналов, например, кодированных псевдошумовых ФМ-сигналов. Противофазный режим для стробирования АМ-сигналов не эффективен, так как энергия сигнала тратится на компенсацию переходной помехи.

Рассмотрим условия дискретизации АМ-радиосигнала, несущая частота которого $f_н=f_{мин}$, а полоса частот, занимаемая сигналом $2F_с\leqslant\Delta f$, где $F_с$ — ширина спектра модулирующего напряжения, Δf — полоса параметрического контура (холодного) по уровню —3 дБ. Для того, чтобы выборки однозначно определяли огибающую АМ сигнала, необходимо выбрать частоту их следования (т. е. частоту следования видеоимпульсов накачки) из условия $F_м\geqslant 2F_с$.

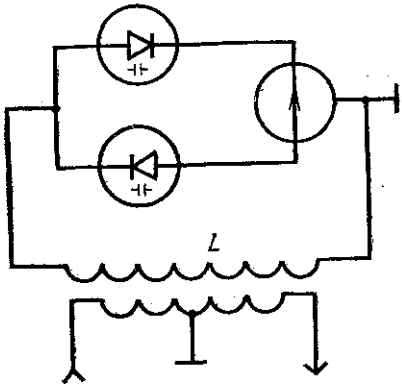
Параметрический контур с видеоимпульсной накачкой обладает фазоселективными свойствами [3, 4], которые приводят к зависимости амплитуды выборок от фазы сигнала (несущей) в момент скачка. Для того чтобы в выборках не содержалась информация о фазе несущей радиосигнала в моменты формирования выборок, необходимо, чтобы частота следования видеоимпульсов накачки $F_м$ была кратна частоте несущей, $f_н=nF_м$, где n — целое (синхронное стробирование).

Экспериментальное исследование дискретизации радиосигнала в параметрическом контуре было проведено на установке, блок-схема которой показана на рис. 1, *а*. Параметрический контур (*ПК*) собран по балансной схеме (рис. 1, *б*). Емкость контура состоит из емкости двух МДП-варикапов. На рис. 1, *в* показана вольт-фарадная характеристика используемых диодов. Управляющее напряжение (накачка) переключает рабочую точку диодов с одной горизонтальной ветви на

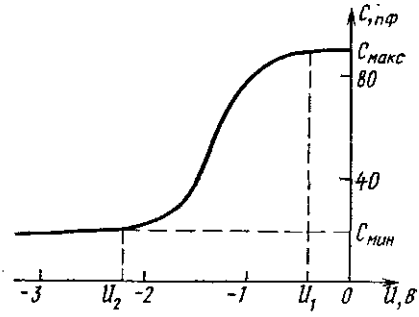
другую. Блок накачки ($БН_1$) (рис. 1, *а*) формирует управляющее напряжение, которое представляет собой последовательность прямоугольных импульсов фиксированной амплитуды $U_и = U_1 - U_2$ и длительности $\tau_и$. Частота следования импульсов $F_м$ задается синхронизатором (*Синхр*). Генератор сигнала (*ГС*) формирует АМ-сигнал, несущая



а



б



в

Рис. 1

частота которого равна нижней частоте контура и задается синхронизатором. Модуляция осуществлялась меандром со 100%-ной глубиной модуляции. Выборки, формируемые параметрическим контуром, поступают на полосовой фильтр (*Ф*), ширина полосы которого $\Delta F = 2/\tau_и$, а центральная частота равна $f_{макс}$. После фильтрации выборки поступают на амплитудный детектор (*АД*), с выхода которого снимаются видеоимпульсы с амплитудой, пропорциональной амплитуде радиосигнала в момент стробирования. Длительность и частота следования этих импульсов равна длительности и частоте следования импульсов накачки.

Используемые в параметрическом контуре МДП-варикапы имеют максимальную емкость $C_{макс} = 88$ пФ и коэффициент перекрытия $K = 4$. При таком перекрытии собственная частота контура изменяется от 250 до 500 кГц. Добротность контура на нижней частоте $Q = 36$, что обеспечивает полосу пропускания по уровню —3 дБ $\Delta f \approx 7$ кГц. Частота несущей радиосигнала $f_н$ выбрана равной нижней частоте ПК $f_н = 250$ кГц. Частота следования радиоимпульсов $F_и = f_н/90 = 2{,}78$ кГц. Частота дискретизации (частота следования видеоимпульсов накачки) выбрана кратной несущей частоте сигнала и равна $F_м = f_н/9 = 27{,}8$ кГц, при этом стробирование каждого радиоимпульса сигнала осуществлялось пять раз. Длительность видеоимпульса накачки $\tau_и = 1/3F_м = 12$ мкс.

На рис. 2 показаны осциллограммы поступающего на вход ПК радиоимпульса сигнала (*а*) и выборок радиосигнала на выходе ПК (*б*)

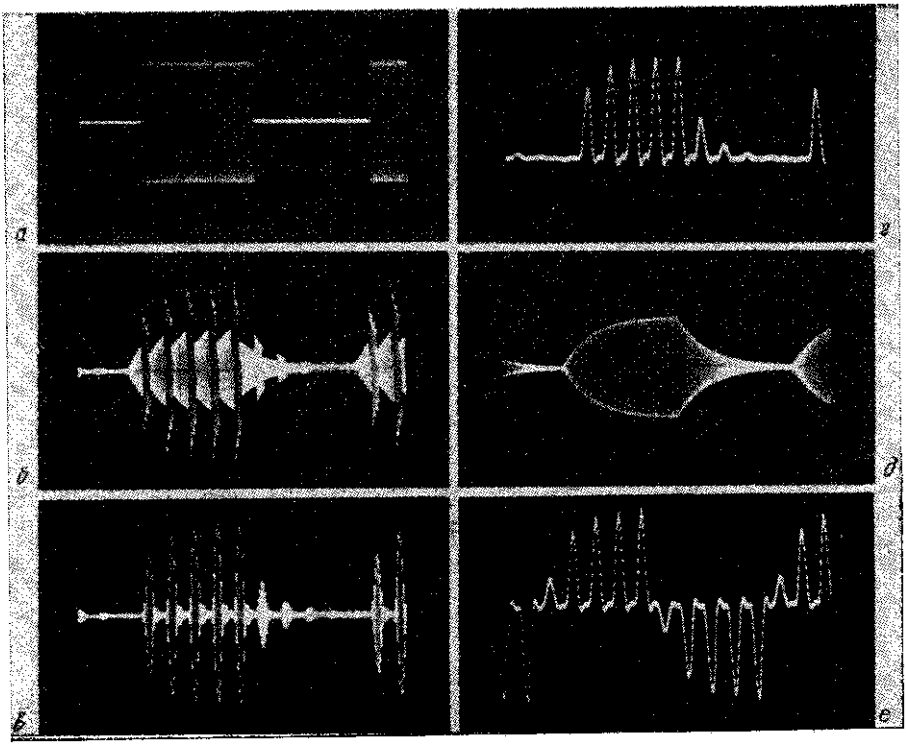
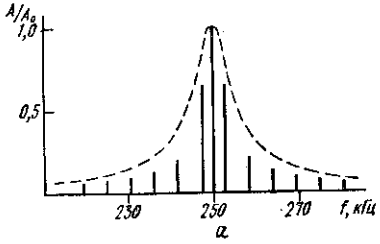
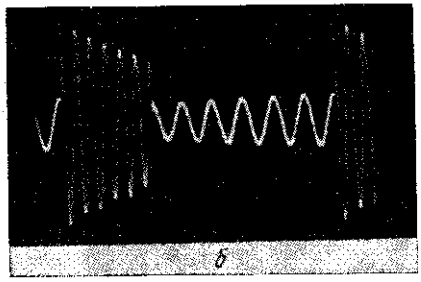
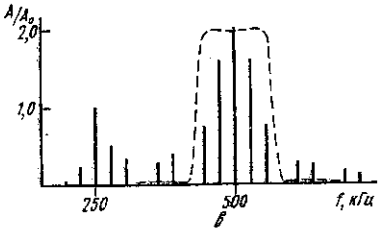

а
г
б
д
в
е

Рис. 2


A/A₀
1,0
0,5
230
250
270
f, кГц
а


б


A/A₀
2,0
1,0
250
500
f, кГц
в

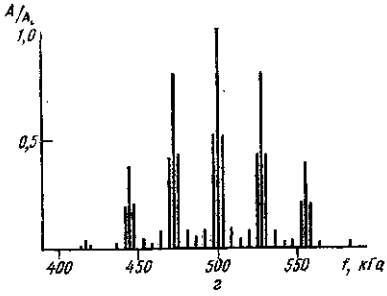

A/A₀
1,0
0,5
400
450
500
550
f, кГц
г

Рис. 3

и фильтра (*в*). На выходе амплитудного детектора (рис. 2, *г*) выборки представляют собой последовательность видеоимпульсов, амплитуда которых пропорциональна амплитуде колебаний, наведенных в ПК радиосигналом.

На рис. 3, *а* изображен спектр колебаний радиосигнала и полоса пропускания исследуемого параметрического контура (показана пунктиром). Из рисунка видно, что полоса частот, занимаемая сигналом, шире полосы пропускания контура. Это приводит к искажению формы радиосигнала, которое проявляется в увеличении длительности фронта прямоугольной огибающей радиосигнала. На рис. 2, *д* для сравнения показана осциллограмма радиосигнала с прямоугольной огибающей, прошедшего через узкополосный фильтр с такой же полосой пропускания, как и у параметрического контура ($\Delta f \approx 7$ кГц). Огибающая отфильтрованного радиосигнала соответствует огибающей видеоимпульсов, полученных параметрическим стробированием прямоугольного радиосигнала.

Использование балансной схемы параметрического контура дает возможность существенно уменьшить силовое ударное возбуждение контура напряжением накачки. В исследуемой схеме ПК амплитуда колебаний, вызванных силовым ударом, была менее 100 мкВ при амплитуде импульса накачки $U_и = 1{,}8$ В. Это ударное колебание определяет нижнюю границу динамического диапазона входных сигналов. Верхняя граница динамического диапазона определяется величиной напряжения, при котором рабочая точка диода остается на горизонтальном участке вольт-фарадной характеристики (рис. 1, *в*) и составляет в исследуемом ПК 0,5 В. Введение в схему ПК дополнительных элементов для регулировки баланса позволяет уменьшать нижнюю границу динамического диапазона до единиц микровольт и дает возможность использовать ПК для дискретизации слабых сигналов без предварительного усиления. Благодаря импульсному параметрическому усилению при формировании выборок в ПК осуществляется предварительное усиление сигнала. Дальнейшее усиление, необходимое для надежной работы амплитудного детектора, может быть осуществлено в активном полосовом фильтре.

На рис. 3, *б* показана осциллограмма выборок на выходе ПК, полученных при приеме непрерывного радиосигнала, а на рис. 3, *в* — соответствующий этому случаю спектр колебаний в ПК. Спектральные составляющие отстоят друг от друга на частоту следования выборок $F_м = 27{,}8$ кГц. Группа составляющих, сосредоточенных вблизи $f_{макс} = 500$ кГц, соответствует выборкам радиосигнала. Эта группа пропускается полосовым фильтром и детектируется для получения видеоимпульсов. Полоса пропускания фильтра показана на рис. 3, *в* пунктиром. На рис. 3, *г* показана часть спектра колебаний на выходе ПК при стробировании АМ сигнала. Боковые составляющие, присутствующие в спектре сигнала (рис. 3, *а*) и попадающие в полосу ПК, сохраняются и в спектре выборок.

Как отмечалось выше, параметрический контур обладает фазоселективными свойствами, которые проявляются в том, что при параметрическом стробировании осуществляется усиление только одной из квадратурных составляющих сигнала. Это делает возможным при стробировании радиосигнала с известной фазой, принимаемого на фоне аддитивного шума, улучшить энергетическое отношение сигнал/шум

в выборке. Исследование этой возможности проводилось на экспериментальной установке. Радиосигнал, представляющий собой непрерывную несущую, складывается с шумом от генератора шума (*ГШ*) (рис. 1, *а*) и подается на вход параметрического контура (*ПК*). С выхода контура выборки через полосовой фильтр (*Ф*) поступают на параметрический квантователь фазы (*ПКФ*), представляющий собой параметрический генератор, работающий в режиме периодических запусков [5]. Запуски ПКФ обеспечиваются блоком накачки ($БН_2$). С выхода ПКФ колебания поступают на фазовый детектор (*ФД*), с которого снимаются двухполярные импульсы, соответствующие двум возможным фазам, 0 и π, колебаний субгармоники ПКФ. Число импульсов положительной полярности определялось счетчиком импульсов (*С*). Для сравнения сумму сигнала и шума можно было подавать непосредственно на вход ПКФ, не осуществляя параметрического стробирования. Результат исследования показан на рис. 4, где приведена зависимость разности вероятностей появления колебаний в ПКФ с фазами 0 и π от отношения сигнал/шум. Кривая *А* соответствует непосредственному приему сигнала, кривая *Б* — приему выборок радиосигнала, полученных параметрическим стробированием. Из графиков следует, что при синхронном параметрическом стробировании можно получить выигрыш в энергетическом отношении сигнал/шум в $\sqrt{4}$ раз (3дБ).

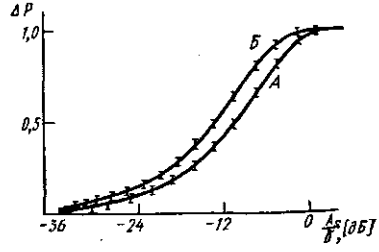


Рис. 4

При синхронном стробировании фаза выборки равна фазе сигнала в момент стробирования. Это свойство ПК может быть использовано при стробировании радиосигнала, представляющего собой АМ сигнал с подавленной несущей (АМ-ПН). При такой модуляции амплитуда несущей (огибающая) равна величине модулирующего напряжения, а фаза несущей меняется на π при изменении знака модулирующего напряжения. Для параметрического стробирования АМ-ПН сигнала без предварительного восстановления несущей необходимо выборки с выхода фильтра подавать на фазовый детектор. Амплитуда импульсов на выходе фазового детектора пропорциональна величине модулирующего напряжения, а полярность соответствует знаку этого напряжения. На рис. 2, *е* показана осциллограмма видеоимпульсов на выходе фазового детектора, полученная при стробировании АМ-радиосигнала с подавленной несущей.

Для создания системы, состоящей из $K-1$ связанных ПК, осуществляющей непрерывный прием радиосигнала и последовательное (циклическое) стробирование, величина добротности каждого ПК должна выбираться в соответствии с наибольшим значением коэффициента параметрического усиления, равного коэффициенту перекрытия емкости K, из условия $Q \geqslant (K\sqrt{K-1})/2(\sqrt{K-1})$, которым учитывается неперекрываемость полос прозрачности $\Delta f_{макс}$ и $\Delta f_{мин}$ соответствующих частотных состояний каждого ПК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.—Л., 1956.
2. Маркюс Ж. Дискретизация и квантование. М., 1969.
3. Комолов В. П., Рознятовский В. А. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1978, **19**, № 2, 118.
4. Комолов В. П., Рознятовский В. А. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1977, **18**, № 1, 105.
5. Комолов В. П., Трофименко И. Т. Квантование фазы при обнаружении радиосигналов. М., 1976.

Кафедра
радиофизики СВЧ

Поступила в редакцию
21.04.78