

УДК 537.867

**О ПРИЕМЕ РАДИОСИГНАЛОВ МЕТОДОМ КВАНТОВАНИЯ
ФАЗЫ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ**

В. П. Комолов, В. А. Полежаев, И. Т. Трофименко, П. Н. Шашков

(кафедра радиопизики СВЧ)

Применение квантования фазы при обнаружении радиосигналов в шумах представляет интерес с точки зрения повышения помехоустойчивости радиоприема и решения ряда инженерно-технических задач, связанных с аппаратурной надежностью и другими характеристиками приемных систем [1]. Резервы повышения помехоустойчивости открываются здесь благодаря возможности преобразования принимаемого сигнала в цифровую форму, т. е. в дискретные квантованные выборки, удобные для обработки на ЭВМ. Эффективными устройствами, осуществляющими такое преобразование, являются параметрические квантователи фазы (ПКФ), которые обладают фазоселективными свойствами, сверхрегенеративным усилением и идеальным ограничением. Обнаружитель, состоящий из ПКФ и следующего за ним устройства последетекторной цифровой обработки, например специализированной ЭВМ, представляет собой приемник прямого детектирования с новыми качественными и функциональными возможностями.

Применение ПКФ в радио- и СВЧ-диапазонах было подробно освещено в [1]. Вместе с тем большой практический интерес представляет применение метода квантования фазы для обнаружения низкочастотных (НЧ) и сверхнизкочастотных (СНЧ) сигналов. Однако в НЧ-диапазоне создание ПКФ затруднительно из-за необходимости использовать большие нелинейные емкости или индуктивности, а в СНЧ-диапазоне оказывается невозможным реализовать необходимую для сверхрегенерации добротность параметрического контура. С другой стороны, с уменьшением частоты накачки увеличиваются длительность переходных процессов в ПКФ и, соответственно, время обнаружения сигнала.

Эти трудности можно обойти с помощью преобразования низкочастотного сигнала вверх на такую рабочую частоту ПКФ, которая обеспечивает необходимую скорость получения выборок сигнала. Заметим, что метод квантования фазы с предварительным преобразованием частоты вверх может быть использован для расширения полосы приема и в других частотных диапазонах. Среди известных преобразователей частоты следует отметить такие устройства, как ключевые и кольцевые модуляторы, усилители-прерыватели [2] и реактивно-коммутируемые фильтры емкостного или индуктивного типа [3]. Характерным свойством таких устройств, в отличие от гетеродинных преобразователей, является подавление центральной составляющей спектра выходного сигнала и выделение и усиление боковых составляющих. Сформированный таким образом ВЧ-сигнал несет информацию о параметрах модулирующего НЧ-сигнала и имеет бинарное эквидистантное распределение фазы, т. е. является оптимальным входным сигналом для ПКФ.

Включение преобразователя частоты, сохраняющего амплитудную информацию о сигнале, может быть полезно для создания канала амплитудной обработки, параллельного фазовому, т. е. для расширения

динамического диапазона, а также для развязки антенных устройств от ПКФ. Преобразование частоты сигнала вверх позволяет увеличить частоту повторения выборок и осуществлять спектральный анализ с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье, т. е. реа-

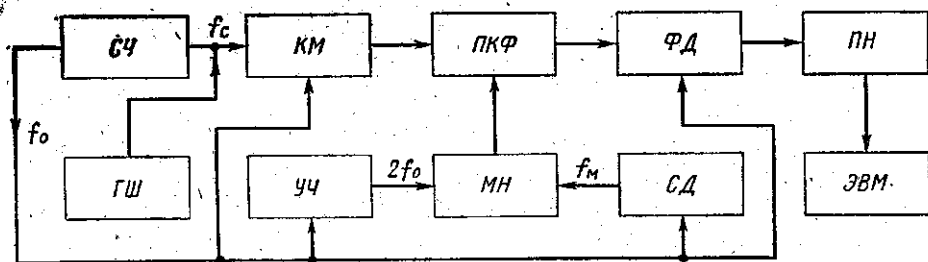


Рис. 1

лизовать многоканальный прием, в том числе и квадратурный, в широкой полосе частот.

Обратимся к результатам экспериментального исследования. На рис. 1 показана блок-схема экспериментального макета цифрового обнаружителя сигнала.

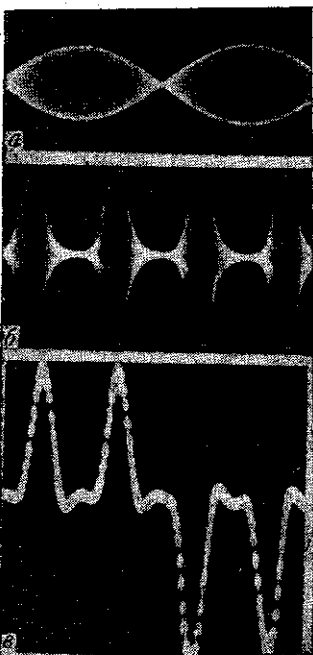


Рис. 2

В качестве источника НЧ-сигнала с частотой f_c , регулируемой в полосе от 5 Гц до 5 кГц, использовался синтезатор частоты СЧ типа Ч6-31 с опорной частотой $f_0=1$ МГц. Частота f_0 являлась также опорной и для всех основных блоков обнаружителя: она использовалась в качестве частоты преобразования кольцевого модулятора КМ, т. е. несущей частоты входного сигнала ПКФ, и опорной частоты фазового детектора ФД. В связи с этим частота регенерированного контура ПКФ была выбрана близкой к частоте f_0 , частота параметрического резонанса равной f_0 , частота накачки — $f_n=2f_0$. Частота накачки получалась с помощью умножителя частоты УЧ. Частота запусков ПКФ, или частота модуляции напряжения накачки f_m , получалась делением частоты f_0 в счетчиковом делителе СД типа ИКЗ-15 и регулировалась в пределах от 20 Гц до 20 кГц. Формирование радиоимпульсного напряжения накачки ПКФ осуществлялось с помощью модулятора накачки МН. В качестве источника шумового напряжения в полосе от 15 Гц до 20 кГц использовался генератор нормального шума ГШ типа Г2-37. Отношение сигнал/шум измерялось на входе кольцевого модулятора и в контуре ПКФ, полоса которого была равна 40 кГц.

Обработка фазовых выборок — биполярных импульсов на выходе фазового детектора проводилась в ЭВМ типа ДЗ-28 с предварительным накопителем ПН. Входной сигнал обнаружителя $U_c(t)$ преобразовывался в КМ в фазоманипулированный сигнал $U(t) = U_c(t) U_0 \sin 2\pi f_c t$ с фазами, принимающими значения 0 или π в зависимости от знака входного сигнала $U_c(t)$. Квантованные значения фаз преобразованно-

го сигнала были оптимальными для ПКФ благодаря подстройке фазы накачки. Выходные радиоимпульсы ПКФ с фиксированной амплитудой и с квантованными значениями фазы преобразовывались в ФД в положительные и отрицательные импульсы. На рис. 2 показаны осциллограммы напряжений: *a* — на выходе кольцевого модулятора, *б* — на выходе ПКФ, *в* — на выходе ФД. Осциллограммы получены при $f_c = 5$ кГц и $f_m = 20$ кГц. Из рис. 2 видно, что при больших значениях амплитуды входного сигнала наблюдается периодичность следования биполярных импульсов на выходе ФД, определяемая частотой входного сигнала в кольцевом модуляторе. При малых отношениях сигнал/шум (U_c/σ) эта периодичность нарушается, а при шумовом сигнале с нулевым средним значением носит случайный, равновероятный характер. Однако спектр шумового сигнала оказывает существенное влияние на характер последовательности выборок, а именно: низкочастотным составляющим спектра соответствуют более длинные серии однополярных импульсов.

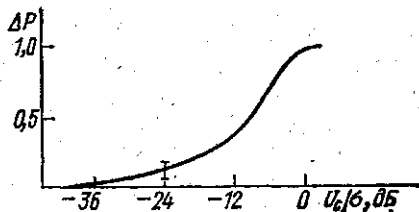


Рис. 3

Вероятности возбуждения параметрических колебаний в ПКФ с фазами 0 или π для малых U_c/σ определяются известными соотношениями [1]: $P_{0,\pi} = 1/2 \pm (U_c/\sigma) \cos \varphi_c$. В эксперименте измеряются относительные частоты появления положительных и отрицательных импульсов на выходе ФД: $h_0 = n/l$, $h_\pi = m/l$, где n , m — число положительных и отрицательных импульсов («единиц» и «нулей»), $l = n + m$ — общее число импульсов (длина выборки). При синхронном приеме выходным сигналом обнаружителя является разность относительных частот $\Delta h = h_0 - h_\pi$, которая при большой длине выборки стремится к соответствующей вероятностной величине $\Delta P = P_0 - P_\pi$. При обнаружении сигнала частоты f_c с неизвестной фазой на фоне шумов частота выборок задавалась соотношением $f_m = 4f_c$, т. е. за период сигнала получались 4 фазовые выборки, сдвинутые одна относительно другой на четверть периода сигнала. Это позволило реализовать четыре квадратурных канала синхронной обработки сигнала известной частоты. Для этого вся последовательность выборок длины l разделялась на 4 подпоследовательности выборок a_{hi} ($k=1, 2, \dots, l/4$, $i=1, 2, 3, 4$), каждая из которых следовала с частотой сигнала f_c и накапливалась в отдельных каналах ПН. На ЭВМ вычислялись Δh в каждой подпоследовательности, а затем их усредненные абсолютные значения:

$$\Delta P = 1/l \sum_{i=1}^4 \left| \sum_{k=1}^{l/4} a_{ki} \right|.$$

На рис. 3 показана экспериментальная зависимость величины ΔP от отношения сигнал/шум при $l = 4 \cdot 10^3$, $f_c = 1$ кГц, $f_m = 4$ кГц. Минимальный сигнал, обнаруживаемый с достоверностью 0,99, отмечен на рис. 3 соответствующим доверительным интервалом. Высокая чувствительность обнаружения обеспечивается здесь увеличением скорости получения выборок в 10^3 раз по сравнению с обычными методами, в соответствии с выбранным коэффициентом преобразования частоты вверх. Таким образом, проведенный эксперимент показал работоспособность и эффективность квантования фазы с предварительным пре-

образованием частоты и подтвердил возможность существенного увеличения его быстродействия в НЧ- и СЧ-диапазонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Комолов В. П., Трофименко И. Т. Квантование фазы при обнаружении радиосигналов. М.: Сов. радио, 1976. [2] Латхи Б. П. Системы передачи информации. М.: Связь, 1971. [3] Комолов В. П., Рознятовский В. А. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1979, 20, № 5, с. 26.

Поступила в редакцию
21.10.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1983. Т. 24, № 3

УДК 539.186.2

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОГЛОЩЕНИЯ ФОТОНОВ В ИЗОЭЛЕКТРОННОЙ СЕРИИ Хе

С. Я. Горощенко, В. С. Ростовский, Н. П. Юдин

(кафедра квантовой теории и физики высоких энергий)

1. Недавно было исследовано сечение $3d$ -фотопоглощения в припороговой области ряда ионов изоэлектронной серии Хе (I^- , Хе, Cs^+ , Ba^{2+} , La^{3+}) [1]. Выяснилось, что для всех изученных атомов и ионов

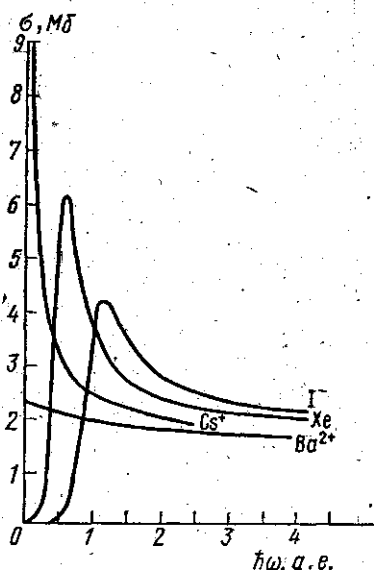


Рис. 1. Сечения переходов $3d \rightarrow ef$ для I^- , Хе, Cs^+ , Ba^{2+} в приближении LS -связи

на кривой фотопоглощения имеются два максимума, которые естественным образом интерпретируются как проявление спин-орбитального расщепления $3d_{5/2} \rightarrow 3d_{3/2}$. Однако вид этих максимумов при переходе от I^- , Хе к Cs^+ , Ba^{2+} и La^{3+} резко меняется. Будучи размытыми для I^- и Хе, они становятся значительно более узкими в случае Cs^+ , Ba^{2+} , La^{3+} . Изменение вида максимумов авторы [1] объясняют тем, что при переходе от Хе к Cs^+ состояние $4f$ «коллапсирует», т. е. становится связанным и локализованным внутри иона. Соответственно, острые максимумы в Cs^+ , Ba^{2+} , La^{3+} объясняются переходами из состояния $3d$ в связанное состояние $4f$. Однако в своих выводах авторы частично опираются на расчеты сечений фотоионизации $3d$ -оболочки, выполненные усредненным по термам методом Хартри—Фока. А этот метод в ряде случаев дает неверные результаты [2]. Целью настоящей заметки является более точное теоретическое исследование переходов $3d \rightarrow ef$ в указанной изоэлектронной серии Хе.

2. За последнее десятилетие выяснилось [2, 3], что имеющиеся теоретические схемы позволяют с хорошей точностью рассчитать сечения фотоионизации для атомов с заполненными оболочками. Стартовым приближением является приближение Хартри—Фока, под которым мы будем понимать решение хартри-фовковской задачи для нейтрального атома и нахождение волновой функции внешнего (т. е. испытывающего