



УКРАЇНА

(19) UA (11) 23019 (13) C1

(51)6 H 03 D 3/00

ДЕРЖАВНЕ
ПАТЕНТНЕ
ВІДОМСТВООПИС ДО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІД

(54) СПОСІБ ЧАСТОТНОЇ ДЕМОДУЛЯЦІЇ

1

(21) 93005475

(22) 21.10.93

(24) 30.06.98

(46) 30.06.98. Бюл. № 3

(56) Голуб В.С. Демодуляція ЧМ коливаний з преобразованием в ФЧМ и ЧИМ. - Радиотехника, 1990, № 3, с. 47-48.

(72) Голуб Владислав Сергійович

(73) Голуб Владислав Сергійович

(57) 1 Спосіб частотної демодуляції, що включається в те, що демодулюваний сигнал затримують, а потім незатриманий і затриманий сигнали фазово детектують один одного, а т л и ч а ю щ и с я т е м, що затримку здійснюють на час, рівний

$$T_{\text{зат}} = (n + kT) / f_0,$$

де $n + kT = B/2 \pi$.

2

n - дійсний число, крім n=0 для першого півцикла характеристики фазового детектування,

 $0 \leq kT < 1$ - відносна координата робочої точки в межах циклу характеристики фазового детектування, $B \leq D\Phi/2$ - індекс фазової модуляції, $D\Phi$ - діапазон фазового детектування,

m - глибина частотної модуляції,

 f_0 - несуча (середня) частота.2. Спосіб по п. 1, о т л и ч а ю щ и с я т е м, що додатково вводять між незатриманим і затриманим сигналами фазовий зсув $D\Phi_0$, при якому відносна координата робочої точки дорівнює $kT + k\Phi$, де $k\Phi = D\Phi_0/2 \pi$.

Изобретение относится к радиотехнике и связи, в частности - к демодуляции сигналов с частотной модуляцией.

Известны способы частотной демодуляции сигналов, заключающиеся в том, что частотно-модулированный (ЧМ) сигнал или только его изменение частоты, обусловленное модуляцией (модулирующее изменение частоты), задерживают, а затем оба сигнала, с задержкой и без задержки, фазово детектируют относительно друг друга. При задержке осуществляется преобразование ЧМ в ФЧМ (фазовая модуляция ФЧМ сигнала относительно ЧМ сигнала), и в результате фазового детектирования ФЧМ сигнала получают частотно-демодулированный сигнал.

Каждый из способов, с задержкой модулирующего изменения частоты (первый способ) и с задержкой сигнала в целом, (второй способ), имеет свои недостатки, ограничивающие их применение

Фаза ЧМ сигнала характеризуется выражением

$$\Phi(t) = \omega_0 t + \int \delta \omega(t) dt, \quad (1)$$

где ω_0 - несущая частота;

$$\delta \omega(t) = \omega_d k_{\text{ЧМ}}(t) = m \omega_0 k_{\text{ЧМ}}(t) \quad (2)$$

- модулирующее изменение частоты;

 ω_d - девиация частоты; $k_{\text{ЧМ}}(t)$ - модулирующая функция,

$$m = \omega_d / \omega_0 \quad (3)$$

- глубина модуляции

Первый способ характеризуется тем, что для преобразования ЧМ в ФЧМ задерживают модулирующее изменение частоты

(19) UA (11) 23019 (13) C1

сигнала (без задержки несущего колебания) и получают

$$\Phi_{\text{зад}}(t) = \omega_0 t + \int \delta \omega(t - T_{\text{зад}}) dt, \quad (4)$$

где, в отличие от (1) и (2):

$$\delta \omega(t - T_{\text{зад}}) = \omega_d k_{\text{ЧМ}}(t - T_{\text{зад}}) = m \omega_0 k_{\text{ЧМ}}(t - T_{\text{зад}}) \quad (5)$$

— задержанное модулирующее изменение частоты;

$k_{\text{ЧМ}}(t - T_{\text{зад}})$ — задержанная модулирующая функция;

$T_{\text{зад}}$ — временная задержка.

Разность двух фаз (1) и (4), которую измеряют при фазовом детектировании,

$$\delta \Phi(t) = \Phi(t) - \Phi_{\text{зад}}(t) \approx K_{\text{ФЧМ}} \omega(t - T_{\text{зад}}/2) = B k_{\text{ФЧМ}}(t), \quad (6)$$

$$K_{\text{ФЧМ}} = T_{\text{зад}} \quad (7)$$

— коэффициент преобразования, определяемый задержкой;

$$B = \Delta K_{\text{ФЧМ}} = \omega_d T_{\text{зад}} = \omega_0 T_{\text{зад}} \quad (8)$$

— индекс фазовой модуляции (индекс ФЧМ);

$$k_{\text{ФЧМ}}(t) = k_{\text{ЧМ}}(t - T_{\text{зад}}/2) \quad (9)$$

— модулирующая функция ФЧМ, задержанная по сравнению с $k_{\text{ЧМ}}(t)$ на $T_{\text{зад}}/2$. В результате преобразования ЧМ в ФЧМ получают модулирующее изменение фазы $B k_{\text{ФЧМ}}(t)$, соответствующее модулирующему изменению частоты $\omega_d k_{\text{ЧМ}}(t)$.

Для фазового смещения и, соответственно, выбора рабочей точки на характеристике фазового детектирования сигнала с задержкой модулирующего изменения частоты дополнительно сдвигают на постоянный угол Φ_0 , который для синусоидальной и треугольной характеристик фазового детектирования берут равным

$$\Phi_0 = \pi/2 \text{ или } -\pi/2. \quad (10)$$

Возможности способа ограничены его реализацией. Для задержки модулирующего изменения частоты используют LC контур (или его эквивалент). Характеристикой преобразования ЧМ в ФЧМ является фазово-частотная характеристика (ФЧХ) контура

$$\Phi(\delta \omega) = -\arctg(T_{\text{зад}} \delta \omega), \quad (11)$$

$$\text{где } T_{\text{зад}} = 2Q / \omega_0 = 2 / \omega_n \quad (12)$$

— временная задержка на частоте ω_0 ;

Q — добротность контура;

ω_0 — резонансная частота контура, равная несущей частоте сигнала;

ω_n — полоса пропускания контура;

$\delta \omega$ — изменение частоты (относительно ω_0), являющееся аргументом функции $\Phi(\delta \omega)$.

Рабочий участок ФЧХ (11) в полосе пропускания контура — в пределах от $\pi/4$ до $-\pi/4$, что определяет диапазон фазового детектирования

$$D \Phi = \pi/2 \quad (13)$$

и соответствует возможным значениям индекса ФЧМ, с учетом (8), (10) и (13),

$$B = m \omega_0 T_{\text{зад}} \leq \pi \Phi/2 = \pi/4 \quad (14)$$

при коэффициенте преобразования, согласно (7) и (14),

$$K_{\text{ФЧМ}} = T_{\text{зад}} < \pi/4 m \omega_0, \quad (15)$$

Согласно (14), индекс ФЧМ пропорционален $m T_{\text{зад}}$, т.е. при малых m ($m \ll 1$) значение B , близкое к $\pi/4$, может быть получено при выборе соответствующего значения $T_{\text{зад}}$ (15). Это — преимущество первого способа по сравнению с вторым рассмотренным ниже. Недостатками первого способа являются:

— возможные значения B ограничены, согласно (14), величиной $\pi/4$ (вместо значений $\pi/2$ и π , допустимых при фазовом детектировании);

— выбор величины $T_{\text{зад}}$ и, соответственно, B ограничен, согласно (12), полосой пропускания ω_n ;

— ФЧХ (11) нелинейна, что является причиной нелинейных искажений ФЧМ сигнала (его модулирующего изменения частоты) и, в результате, демодулированного сигнала (уменьшение нелинейных искажений возможно при уменьшении B , однако это приведет к увеличению относительного уровня помех и искажений, вносимых устройствами преобразования и детектирования).

Второй способ характеризуется тем, что для преобразования ЧМ в ФЧМ задерживают сигнал в целом (модулирующее изменение частоты и несущее колебание). ФЧХ преобразования

$$\Phi(\omega) = -T_{\text{зад}} \omega, \quad (16)$$

в отличие от (11), линейна, но аргументом ее функции является не $\delta \omega$, а $(\omega = \omega_0 + \delta \omega)$. В результате, в отличие от (4) и (6),

$$\Phi_{\text{зад}}(t) = \omega_0(t - T_{\text{зад}}) + \int \delta \omega(t - T_{\text{зад}}) dt; \quad (17)$$

$$\delta \Phi(t) \approx \Phi_0 + K_{\text{ФЧМ}} \delta \omega(t - T_{\text{зад}}/2) = \Phi_0 + B k_{\text{ФЧМ}}(t), \quad (18)$$

$$\text{где } \Phi_0 = \omega_0 T_{\text{зад}} \quad (19)$$

— постоянный фазовый сдвиг, получаемый, в отличие от (10), в результате задержки несущего колебания;

$K_{\text{ФЧМ}}(t - T_{\text{зад}}/2) = B k_{\text{ФЧМ}}(t)$ — согласно (6);

$K_{\text{ФЧМ}}$, B и $k_{\text{ФЧМ}}(t)$ — согласно (7), (8) и (9).

Согласно (8) и (19), B и Φ_0 , обусловленные

50 $T_{\text{зад}}$, взаимосвязаны:

$$B = m \Phi_0 \quad (20)$$

Фазовый сдвиг Φ_0 (19) используют, подобно (10), для фазового смещения. Обычно $\Phi_0 = \pi/2$ или π (21)

55 для диапазона фазового детектирования

$$\Phi = \pi \text{ или } 2\pi \quad (22)$$

соответствующего первым полуциклам треугольной и пилообразной характери-

стик детектирования. При этом величина B ограничена диапазоном детектирования (22):

$$B \leq D\Phi\pi/2 \text{ или } \pi. \quad (23)$$

Значение (23) являются предельно возможным (для первого способа, согласно (14), $B \leq \pi/4$), а реально, согласно (20) и (21),

$$B = m\pi/2 \text{ и } m\pi \quad (24)$$

для указанных выше характеристик и не могут быть увеличены путем увеличения $T_{\text{зад}}$. При этом, согласно (19), (21) и в отличие от (15),

$$K_{\text{ФЧМ}} = T_{\text{зад}} \omega_0 \pi/2 \text{ и } \pi \omega_0. \quad (25)$$

(Возможно несущественное увеличение B при соответствующем, обусловленном $T_{\text{зад}}$, увеличении Φ_0 в пределах $D\Phi$)

В результате, значения B и $K_{\text{ФЧМ}}$, обусловленные (24) и (25), в отличие от (14) и (15) для первого способа не могут быть увеличены при $m \ll 1$. Так, например, при $m=0.01$, согласно (24), $B=0.005\pi$ и 0.01π , что в $1/m=100$ раз меньше допустимых значений (23) и меньше, согласно (14), $B \rightarrow \pi/4$ для первого способа. В результате, при $m \ll 1$ не используются возможности фазового детектирования, а при воздействии помех и искажений, вносимых устройствами преобразования и детектирования, демодуляция может быть вообще нарушена. Сказанное является существенным недостатком второго способа, ограничивающим его применение. Способ применяют при больших значениях m (например, при $m=0.3$ и 0.4) в аппаратуре магнитной записи.

Итак, рассмотренные способы обладают недостатками, ограничивающими их применение. В соответствии с изложенным автором поставлена задача предложить такой способ демодуляции, который был бы лишен указанных недостатков, обладал бы положительными свойствами обоих способов (отсутствием ограничения значений $K_{\text{ФЧМ}}$, в том числе при $m \ll 1$, и линейностью характеристики преобразования без ограничения полосы пропускания) и отличался бы, в конечном счете, низким уровнем вносимых искажений. В качестве прототипа выбран второй способ как наиболее близкий к заявляемому способу.

Для осуществления поставленной задачи автором предлагается способ частотной демодуляции, заключающийся в том, что демодулируемый сигнал задерживают, а затем незадержанный и задержанный сигналы фазово детектируют относительно друг друга, отличающийся тем, что задержку осуществляют на время, равное

$$T_{\text{зад}} = (n+kt)/f_0, \quad (26)$$

$$\text{где } n+kt = B/2\pi; \quad (27)$$

n - действительное число ($n=0, 1, 2, \dots$), кроме $n=0$ для первого полуцикла характеристики фазового детектирования;

$$0 \leq kt < 1 \quad (28)$$

5 - относительная координата рабочей точки в пределах цикла характеристики фазового детектирования;

$$B \leq D\Phi/2\pi \quad (29)$$

10 - индекс фазовой модуляции (согласно (23));

Φ - диапазон фазового детектирования;

m - глубина частотной модуляции;

15 f_0 - несущая (средняя) частота ($f_0 = \omega_0/2$).

Согласно предлагаемому способу, коэффициент преобразования $K_{\text{ФЧМ}}$ можно изменить только в дробное число раз (26). Для переключения его в целое число раз дополнительно вводят между незадержанным и задержанным сигналами фазовый сдвиг $\Delta\Phi_0$, при котором относительная координата рабочей точки равна

$$kt + k_{\Phi}, \quad (30)$$

$$\text{где } k_{\Phi} = D\Phi_0/2\pi. \quad (31)$$

Выше используются термины "цикл" и "полуцикл" характеристики фазового детектирования. Цикл - повторяющаяся часть характеристики, а полуциклы - восходящая и нисходящая части цикла. Для треугольной характеристики нечетные (например, восходящие) полуциклы - от 0 до π , от 2π до 3π и т.д., а четные (нисходящие) - от π до 2π , от 3π до 4π и т.д. Для пилообразной характеристики нечетные (восходящие) полуциклы - от 0 до 2π , от 2π до 4π и т.д., а четные (нисходящие) - в точках 2π , 4π и т.д. При инвертировании характеристик нечетные полуциклы становятся нисходящими, а четные - восходящими. Рабочими (используемыми для детектирования) являются нечетные и четные полуциклы треугольной характеристики и нечетные полуциклы пилообразной характеристики. Диапазон фазового детектирования Φ соответствует, согласно (22), полным рабочим полуциклам треугольной и пилообразной характеристик, являющихся кусочно-линейными характеристиками, и части полуцикла, если характеристика (например, синусоидальная) нелинейна.

Согласно предлагаемому способу, фаза задерживаемого сигнала выражается уравнениями (17) и (18) (задержка сигнала в целом), но благодаря задержке, определяемой (26), индекс модуляции, с учетом (8),

$$B = m\omega_0 T_{\text{зад}} = 2\pi(n+kt)m, \quad (32)$$

тогда как для способа-прототипа

$$B = m\omega_0 T_{\text{зад}} = 2\pi ktm, \quad (33)$$

где $k_1 \leq k_T$ — для первого полуцикла характеристики фазового детектирования (выражение (33) соответствует (32) при замене $n+k_T$ на k_1 и (24) при $k_1=1/4$ и $1/2$). Отличительной особенностью предлагаемого способа является то, что он обеспечивает, согласно (32) и по сравнению с (33), "усиление" фазовой модуляции в $(n+k_T)/k_1$ раз где, в большинстве случаев, $n \gg k_T$ (при $k_1 \leq k_T$), устраняя тем самым недостаток прототипа. При $m=0,01$ и, например, $n=24$, $k_T=1/4$ (для треугольной характеристики) индекс модуляции, согласно (32), $B=0,485 \rightarrow \pi/2$, а при $n=48$, $k_T=1/2$ (для пилообразной характеристики) $B=0,97 \rightarrow \pi$, что соответствует предельным возможным значениям (23). Для прототипа, как указывалось выше и согласно (33) при $k_1=1/4$ и $1/2$, индекс модуляции $B=0,005 \pi$ и $0,01 \pi$. Таким образом, при использовании предлагаемого способа достигается "усиление" в $1/m = 100$ раз. Соответственно, при $m=0,001$ — в 1000 раз.

Постоянный фазовый сдвиг, согласно (19), обеспечивающий необходимое фазовое смещение

$$\Phi_0 = \omega_0 T_{\text{зад}} = 2\pi(n + k_T) \rightarrow 2\pi k_T, \quad (34)$$

(с учетом того, что $2\pi n \rightarrow 0$ при $n=0, 1, 2, \dots$).

Фаза задержанного сигнала и постоянный фазовый сдвиг для частного случая осуществления способа, с учетом Φ_0 , согласно (31), и в отличие от (17) и (19), равны

$$\Phi_{\text{зад}}(t) = \omega_0(t - T_{\text{зад}}) + \int \delta \omega(t - T_{\text{зад}}) dt + D \Phi_0; \quad (35)$$

$$\Phi_0 = \omega_0 T_{\text{зад}} + \Phi_0 2\pi(k_T + k_\Phi), \quad (36)$$

где $T_{\text{зад}}$ определяют согласно (26), а $\delta \Phi(t)$ — согласно (18). При $k_T=0$ и согласно (26) и (36), $T_{\text{зад}} = n/f_0$; $\Phi_0 \rightarrow D \Phi_0 = 2\pi k_\Phi$.

Для предлагаемого способа при $k_T=0$, согласно (28), $T_{\text{зад}}$ — также определяют согласно (37) — случай характеристики фазового детектирования с "собственным" смещением.

Предлагаемый способ в частном случае осуществления обладает теми же преимуществами: при $n=24$ и 48 , $k_T=0$ и $k_\Phi=1/4$ и $1/2$ индекс модуляции $B=0,48 \rightarrow \pi/2$ и $B=0,96 \rightarrow \pi$ (при $n=25$ и 50 $B=0,5 \pi$ и, кроме того, как указывалось выше, дополнительный эффект, если требуется, например, переключение коэффициента преобразования в целое число раз. При демодуляции сигналов с $m=0,01$, $0,001$ и $0,0001$ коэффициент преобразования $K_{\text{ФЧМ}}$, равный $T_{\text{зад}}$ и определяемый (37), изменяют в 10 и 100 раз со-

ответствующим изменением n в 10 и 100 раз (по сравнению с $K_{\text{ФЧМ}}$ при $m=0,01$).

Сущность изобретения поясняется чертежами, где на фиг. 1 представлена ФЧХ преобразования $\Phi(\omega)$ (16) с $D \Phi_0 = -\pi/2$ и треугольная характеристика детектирования $u[\Phi(\omega)]$ с данными: $n=0$ и 1 , $k_T=1/2$, $k_\Phi=1/4$ (второй и четвертый полуциклы); на фиг. 2 — ФЧХ преобразования $\Phi(\omega)$ (16) с $D \Phi_0 = -\pi$ и пилообразная характеристика детектирования $u[\Phi(\omega)]$ с данными: $n=1$ и 3 , $k_T=0$, $k_\Phi=1/2$ (второй и четвертый циклы); на фиг. 3 — структурная схема для осуществления предлагаемого способа (где 1 — вход демодулируемого сигнала; 2 — фазовращатель (для предлагаемого способа в частном случае осуществления); 3 — фазовый детектор; 4 — устройство задержки; 5 — вход последовательности тактовых импульсов; 6 — выход демодулятора); на фиг. 4 — таблица с результатами демодуляции по предлагаемому способу и, для сравнения, по первому способу.

На фиг. 1 и 2 для сравнения показаны по две характеристики

$$D \Phi_0 = \omega T_{\text{зад}1} \text{ и } D \Phi_0 = \omega T_{\text{зад}2}, \quad (39)$$

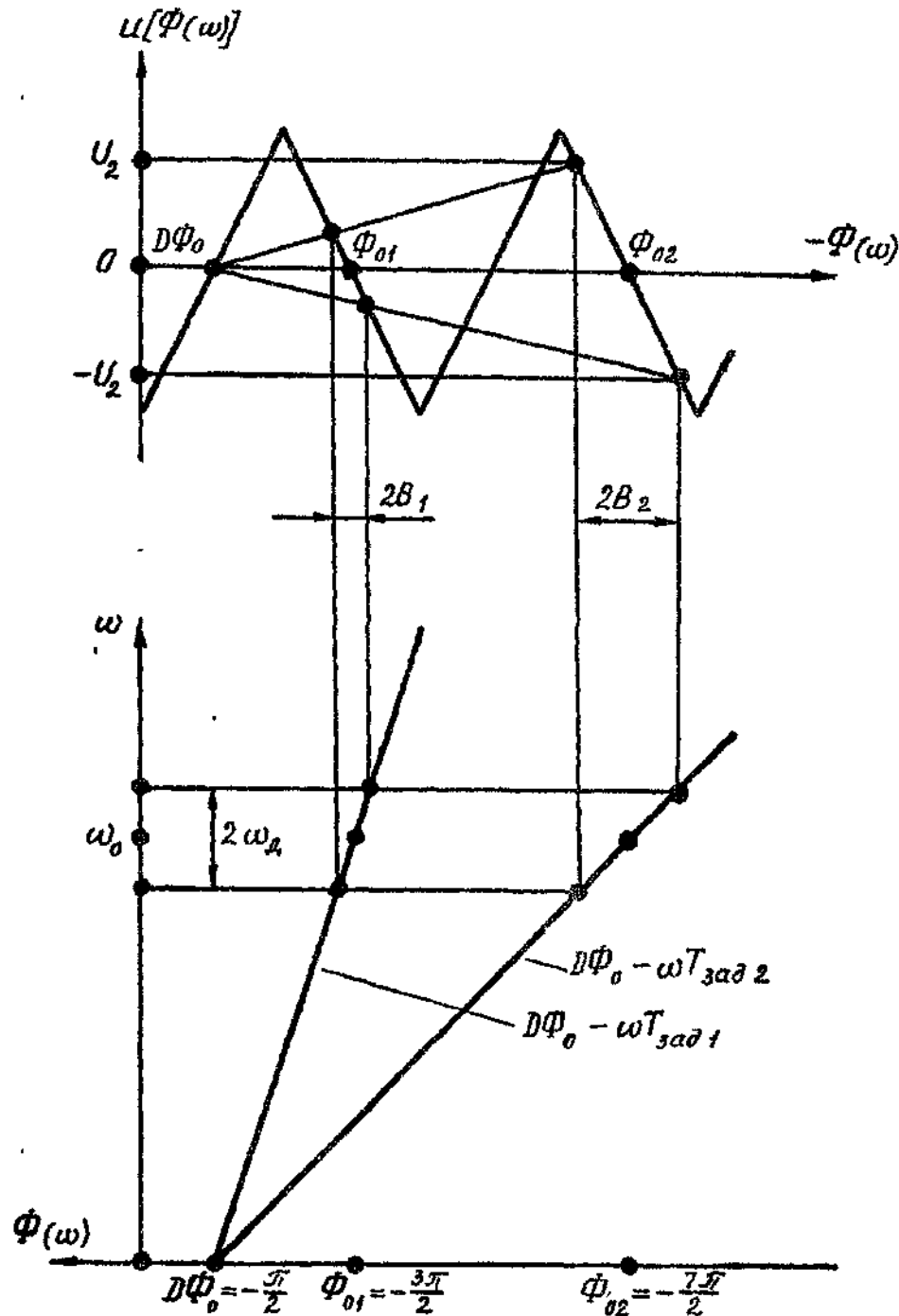
соответствующие разным задержкам: $T_{\text{зад}2} = 3T_{\text{зад}1}$. Значения $D \Phi_0$, Φ_{01} и Φ_{02} на фиг. 1 и 2 показаны со знаком "-", что обусловлено их отсчетом (на фиг. 1 и 2) относительно незадержанного сигнала (в приведенных выше выражениях — относительно задержанного сигнала). На характеристиках по казано, как увеличение задержки, с переходом на другие полуциклы или циклы характеристик фазового детектирования, приводит к увеличению индексов модуляции и, соответственно, значений U_2 и $-U_2$ характеристики $u[\Phi(\omega)]$. Выше, в тексте, приведены примеры использования более "дальних" циклов: $n=24$ и 48 при $m=0,01$. При $m=0,001$, соответственно, $n=240$ и 480 (в пределе, $n=250$ и 500).

На фиг. 3 фазовращатель 2 включен перед устройством задержки 4, но может быть включен после него, перед входом фазового детектора 3. Фазовращатель может быть включен в цепи незадержанного сигнала, перед другим входом фазового детектора.

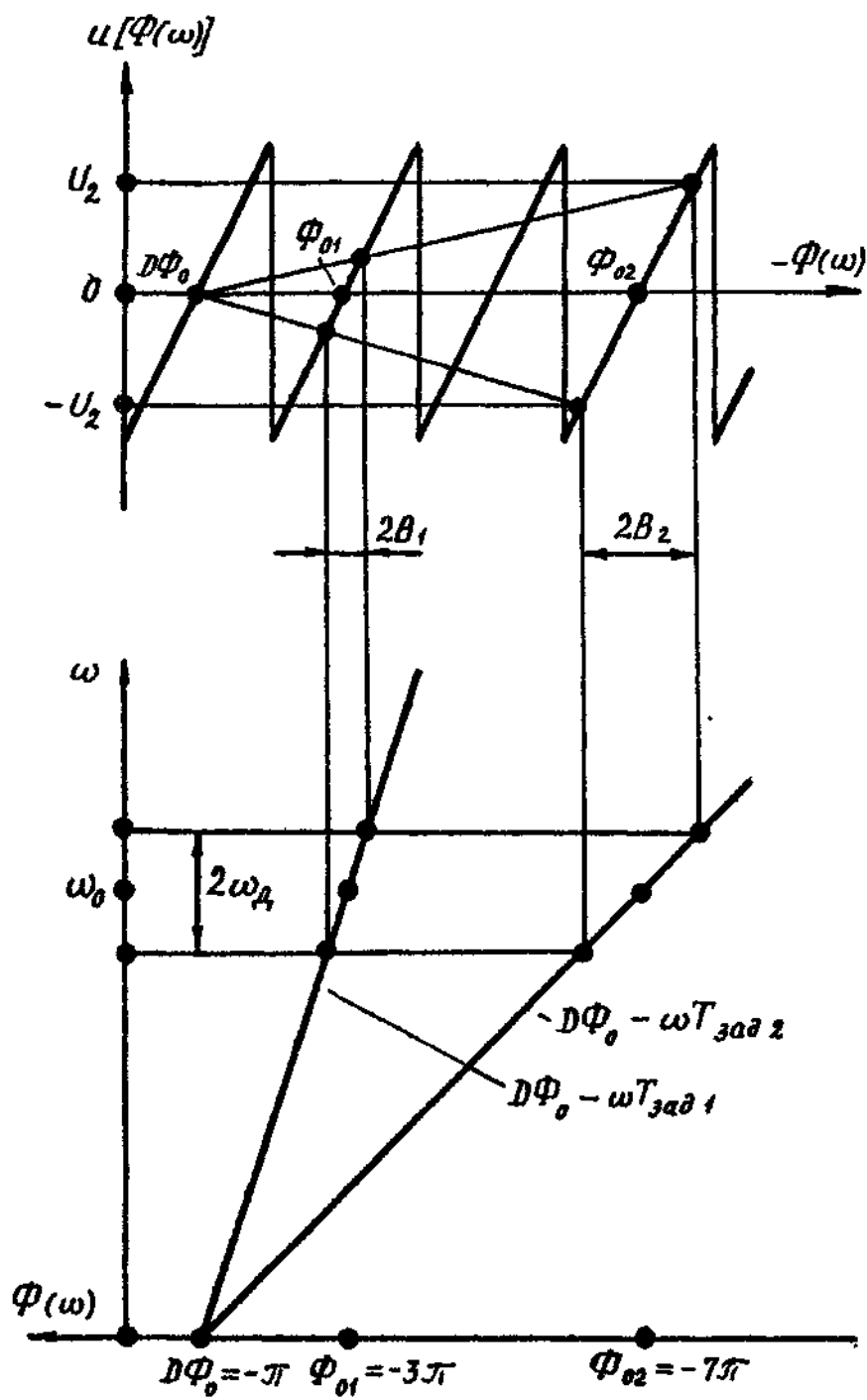
Устройство выполнено на известных элементах. Демодулятор, реализующий предлагаемый способ, обеспечивает демодуляцию многопозиционных сигналов с частотной манипуляцией и значениями частот в пределах от $f_0 - f_{\text{дмакс}}$ до $f_0 + f_{\text{дмакс}}$, где $f_0 = 25$ кГц, а переключаемые $f_{\text{дмакс}} = \omega_{\text{дмакс}}/2\pi = 50, 100, 200, 400, 800$ и 1600 Гц ($m=0,002, \dots, 0,064$). Устройство задержки 4

(фиг. 3) собрано на статических ОЗУ типа 132РУ5, обычно используемых для подобных целей и управляемых, в данном случае, тактовой последовательностью импульсов с "кварцовой" частотой $f_T = 3,2$ МГц. В приведенной на фиг. 4 таблице показаны результаты сравнительной проверки демодуляции по предлагаемому способу и по первому способу. Из таблицы видно, что демодуляция по предлагаемому способу обладает линейной характеристикой и "нулем" на выходе при $f_d = 0$. Демоду-

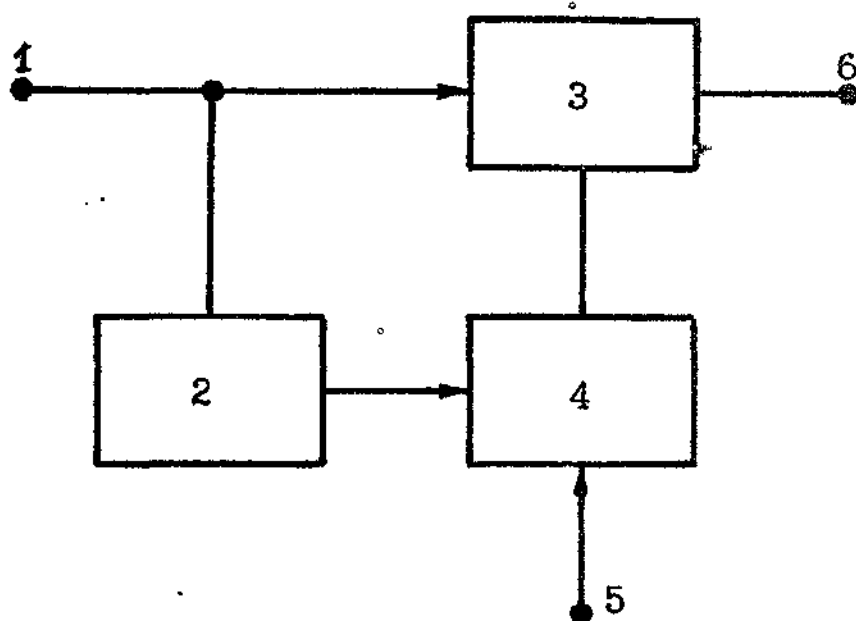
ляция по первому способу обладает нелинейной характеристикой и, кроме того, смещение "нуля", обусловленным неточной настройкой контура на среднюю частоту ЧМ колебания. Демодуляция по второму способу (прототипу) невозможна при $m = 0,002, \dots$ из-за низкого коэффициента преобразования КФЧМ (25), при котором, согласно (24), $B = m \pi/2 = 0,001 \pi, \dots$, при $D\Phi = \pi$, тогда как для предлагаемого способа $B \rightarrow \pi/2$.



Фиг. I



Фиг. 2



Фиг. 3

f_D	Выходное напряжение, В	
	Первый способ	Предл. способ
$f_{D \text{ макс}}$	1,1	1,0
$f_{D \text{ макс}}/2$	0,75	0,5
0	0,1	0,0
$- f_{D \text{ макс}}/2$	- 0,55	- 0,5
$- f_{D \text{ макс}}$	- 0,9	- 1,0

Фиг. 4

Упорядник

Техред М.Келемеш

Коректор М.Керецман

Замовлення 4516

Тираж

Підписне

Державне патентне відомство України,
254655, ГСП, Київ-53, Львівська пл., 8

Відкрите акціонерне товариство "Патент", м. Ужгород, вул.Гагаріна, 101
