

Д.К. АВДЕЕВА, О.Н.ВЫЛЕГЖАНИН, С.А.РЫБАЛКА, И.А. КЛУБОВИЧ
ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ФИЛЬТРА.

Томский политехнический университет, ОСП НИИ интроскопии

В настоящей работе обсуждается задача формирования фильтра, основанного на различии фазовых свойств измеряемого сигнала и искажающей его помехи. Фаза измеряемого сигнала предполагается регулярной, а фаза шума – случайная функция.

Как было показано ранее [1], подобный фильтр может быть построен с использованием опорного импульса специального вида, показанного на рис.1.

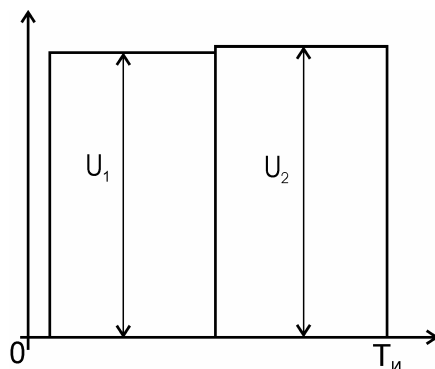


Рис. 1. Форма опорного импульса

Импульс имеет две прямоугольные ступени с амплитудами U_1 и U_2 соответственно, общая длительность ступеней немного меньше длительности интервала наблюдения $T_и$.

Как показали результаты анализа, при соотношениях амплитуд ступеней сигнала и отношении длительности интервала измерения к общей длительности ступеней близких к 1 увеличивается чувствительность фазы к изменению напряжения (амплитуды ступени U_2). При этом зависимость фазы от D (отношение амплитуды второй ступени к амплитуде первой) M (отношение длительности интервала измерения к суммарной длительности ступеней) имеет вид:

$$j(\omega) = \arctg \left[\frac{1-D}{1+D} \operatorname{tg} \left(\frac{p}{2M} \right) \right]$$

На рис.2 показан график зависимости фазы основной гармоники спектра импульсного сигнала с частотой ω от D при значении $M=1.000500025$. Как видно из рисунка, при переходе этого отношения через 1 в интервале значений D от 0.9999 до 1.0001 значение фазы изменяется скачком, а при дальнейшем удалении от 1 асимптотически приближается для малых значений к $-\pi/2$ а для больших к $\pi/2$.

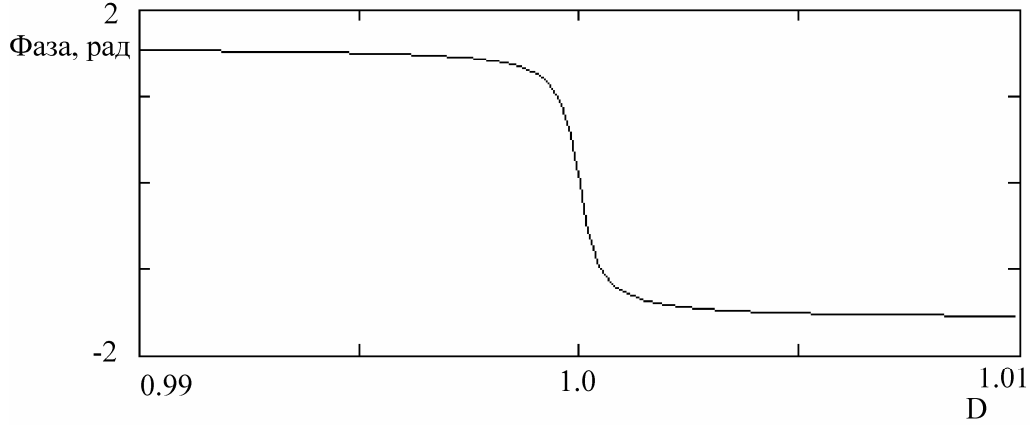


Рис.2. График зависимости фазы основной гармоники опорного сигнала от отношении амплитуд первой и второй ступеней при значении $M=1.000500025$

Если на интервале от $T_{И}/2$ до $T_{И}$ у опорного импульса появится случайная помеха, то его гармоническая составляющая w_i будет модулирована по амплитуде и фазе в виде: $U_i(t) = [U_{i\max} + \Delta U_z(t)] \sin[w_i t + j_i + \Delta j_i(t)]$. Это колебание может быть представлено в виде разложения при условии ограничения амплитуды:

$$U_i(t) = U_{i\max} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(b) \cdot \cos[(w_i + n\Omega_n)t + nj_n + j_i],$$

где $J_n(b)$ – функция Бесселя n -го порядка от аргумента b . В данном случае, аргумент функции Бесселя (глубина модуляции) равен $b = n\Omega_n t + nj_n$, где Ω – значение частоты основной гармоники, а φ_n – значение фазы модулирующего сигнала.

Если модулирующих синусоидальных составляющих несколько, то получим [2]:

$$U_{i\Sigma}(t) = U_{i\Sigma\max} \sum_{p,r,q,\dots=-\infty}^{\infty} J_p(b_1) \cdot J_r(b_2) \cdot J_q(b_3) \cdot \dots \dots \sin \left[(w_i + p\Omega_{n1} + r\Omega_{n2} + q\Omega_{n3} + \dots)t + \sum_{p=-\infty}^{\infty} pj_{n1} + \sum_{r=-\infty}^{\infty} rj_{n2} + \dots + j_i \right], \quad (1)$$

Где b – глубины модуляции, W – частоты, а j – начальные фазы модулирующих гармоник. Учитывая взаимное уничтожение членов нечетных порядков $J_n(b)$, в сумму входят члены только четных порядков. Таким образом, модулируемое колебание содержит набор частот, отстоящих выше и ниже от основной частоты. Учитывая, что при модуляции полная энергия колебания не меняется, появление комбинационных частот приводит к уменьшению энергии основной частоты и перераспределению ее на другие частоты. Этот фактор определяет эффективность фильтра. Хотя в выражении (1) оператор суммирования выполняется для индексов от минус бесконечности до плюс бесконечности, в реальных вычислениях, в силу быст-

рого убывания значений функции Бесселя высоких порядков и учитывая только слагаемые по модулю больше 0.01, для суммирования достаточно трех членов 0, 2, 4 порядка.

Другим важным параметром, определяющим эффективность описываемого фильтра, является глубина модуляции. Анализ показывает, что если при появлении помехи знак разности $1 - D$ не меняется, то максимальная глубина фазовой модуляции не больше, чем $\pi/2$ (гармоники находятся в противофазе). Фактически достижима даже меньшая глубина модуляции. Для такого аргумента значение функции Бесселя нулевого порядка будет больше значений этой функции для более высоких порядков, а следовательно, среди комбинаторных частот, получающихся при фазовой модуляции в соответствии с выражением (1) значение амплитуды основной частоты будет максимальным. В таблице 1 приведены значения амплитуд комбинаторных частот при фазовой модуляции четырьмя гармониками. На рис.3 приведен график распределения этих амплитуд.

Таблица 3. Распределение амплитуд для комбинаторных частот при фазовой модуляции сигнала на основной частоте, равной 1. Модулирующие гармоники имели частоты 0.01, 0.02, 0.03 и 0.04, глубина модуляции 1.57

№	частота	амплитуда	№	частота	амплитуда
1	0.82	0.0110	11	1.02	0.0874
2	0.84	0.0161	12	1.04	0.0810
3	0.86	0.2645	13	1.06	0.0737
4	0.88	0.0371	14	1.08	0.0611
5	0.90	0.0479	15	1.10	0.0479
6	0.92	0.0611	16	1.12	0.0371
7	0.94	0.0737	17	1.14	0.2645
8	0.96	0.0810	18	1.16	0.0161
9	0.98	0.0874	19	1.18	0.0110
10	1.00	0.0927			

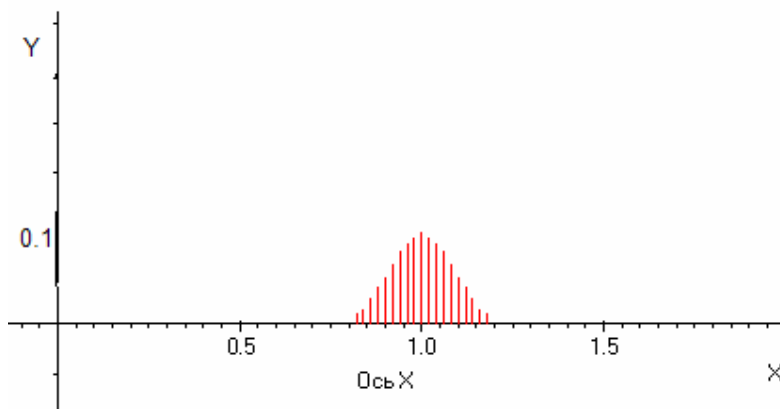


Рис.3. Распределение амплитуд комбинаторных частот при фазовой модуляции сигнала на основной частоте, равной 1. Частоты модулирующих гармоник равны 0.01, 0.02, 0.03 и 0.04, глубина модуляции 1.57

Как видно из рисунка 3, максимальной амплитуде является гармоника на основной частоте 1. При увеличении глубины модуляции можно получить существенное уменьшение амплитуды основной гармоник по сравнению с комбинаторными. В таблице 2 приведены значения амплитуд комбинаторных гармоник при глубине модуляции, равной 2.5, а на рис.4 приведен график распределения амплитуд для этого случая.

Таблица 2. Распределение амплитуд для комбинаторных частот при фазовой модуляции сигнала на основной частоте, равной 1. Модулирующие гармоники имели частоты 0.01, 0.02, 0.03 и 0.04, глубина модуляции 2.5

№	частота	амплитуда	№	частота	амплитуда
1	0.72	0.0102	12	1.00	0.0622
2	0.76	0.0136	13	1.02	0.0220
3	0.78	0.0144	14	1.04	0.0966
4	0.80	0.0563	15	1.08	0.1002
5	0.84	0.0502	16	1.10	0.0110
6	0.86	0.0171	17	1.12	0.0487
7	0.88	0.0487	18	1.14	0.0171
8	0.90	0.0110	19	1.16	0.0502
9	0.92	0.1002	20	1.20	0.0563
10	0.96	0.0966	21	1.22	0.0144
11	0.98	0.0220	22	1.24	0.0136

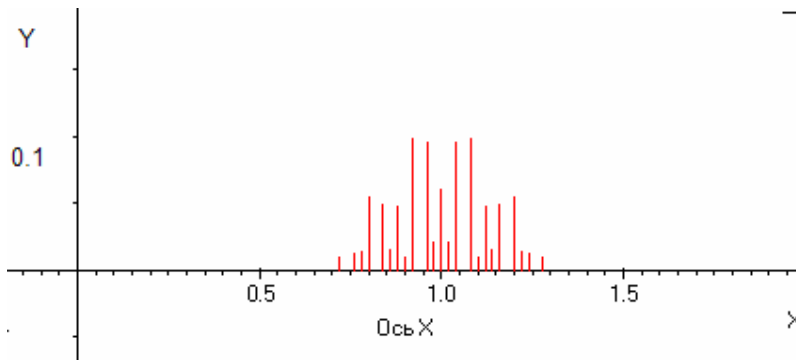


Рис.4. Распределение амплитуд комбинаторных частот при фазовой модуляции сигнала на основной частоте, равной 1. Частоты модулирующих гармоник равны 0.01, 0.02, 0.03 и 0.04, глубина модуляции 2.5

случайных чисел, равномерно распределенных на исследуемом интервале с математическим ожиданием 0.01 значение фазы основной гармоники оказалось равным 0.4529350452. Таким образом, достигнута глубина модуляции порядка 2.1. Как видно из анализа рис.2, для достижения глубины модуляции больше чем $\pi/2$ необходимо, чтобы при появлении помехи знак разности $1 - D$ изменился. Для этого необходимо, чтобы для опорного импульса $D < 1$, а появление помехи приводило к $D > 1$.

Так при модельных вычислениях для опорного импульса с параметрами $D=0.999900$ и $M=1.000500025$ значение фазы основной гармоники было равно -1.56766724 , а при появлении помехи, состоящей из гармоники с частотой 0.05 от основной и амплитудой 0.02 , а также последовательности

Литература.

1. Патент 2133474 Россия. МКИ 19/02. Способ измерения сигналов произвольной формы в присутствии случайных шумов/ Д.К.Авдеева. заявлено 30.10.1997; Опубл. 20.07.1997, Бюл. № 20.15с.
2. И.С.Гоноровский Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для ВУЗов.- 4-е изд.; М.: «Радио и связь», 1986.- 512 с.