

О ДОСТИЖИМОМ ЧИСЛЕ ЦИРКУЛЯЩИЙ СИГНАЛА В РЕЦИРКУЛЯТОРЕ С КОЛОКОЛЬНОЙ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ КОЛЬЦА

В. А. Хорунжий

Одним из устройств, осуществляющих квазиодновременный спектральный анализ входного сигнала, является накопительный рециркулятор на линии задержки со сдвигающим гетеродином в кольце обратной связи [1—4]. Основные технические параметры такого анализатора — разрешающая способность в некотором динамическом диапазоне амплитуд и время анализа — определяются числом циркуляций сигнала в кольце и применяемого вида весовой обработки сигнала [2].

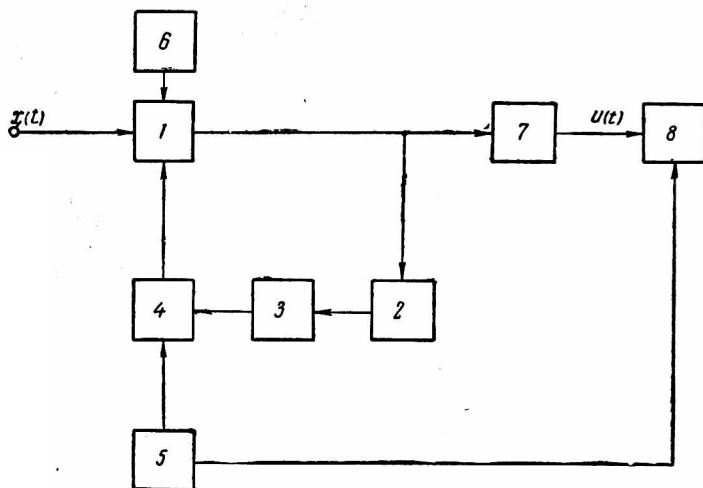


Рис. 1. Функциональная схема накопительного рециркулятора:

1 — суммирующий каскад; 2 — линия задержки на время T ; 3 — усилитель с частотной характеристикой $K(\omega)$; 4 — преобразователь частоты с выделением верхней боковой полосы; 5 — генератор частоты $\Omega = \frac{2\pi}{T}$; 6 — генератор импульсов строка, открывающих кольцо на время NT ; 7 — детектор; 8 — индикатор.

Получение большого числа циркуляций — довольно сложная техническая задача. Основными ограничениями следует считать нестабильность коэффициента усиления кольца во времени, непостоянство усиления в рабочей полосе частот, наличие ложных сигналов на выходе линии задержки и накопление собственных шумов усилителя. В работе рассматривается ограничение эффективного числа циркуляций, обусловленное непостоянством усиления в рабочей полосе частот для случая колокольной частотной характеристики разомкнутого тракта рециркулятора, имеющего наибольшее практическое значение.

Упрощенная функциональная схема спектроанализатора приведена на рис. 1.

На выходе рециркулятора после N циркуляций формируется отклик, амплитуда которого равна сумме амплитуд элементарных отрезков входного сигнала длительностью T каждый, прошедших различное число (от 0 до $N - 1$) раз по кольцу.

При входном гармоническом сигнале с единичной амплитудой $x(t) = \cos \omega t$ и идеальной частотной характеристике кольца $K(\omega) = K$ (для обеспечения устойчивости схемы следует выбирать $K < 1$) участки сигнала суммируются с весовыми множителями вида K^n , где n — число пробегов по кольцу.

Очевидно, эквивалентное распределение амплитуд суммируемых отрезков входного сигнала в этом случае является экспонентой.

Однако такая аппроксимация частотной характеристики кольца при числе циркуляций $N = 20-30$ уже неверна [3].

Амплитуду и форму отклика на выходе рециркулятора при этом следует определять с учетом реальной частотной характеристики кольца, которая всегда отлична от прямоугольной и во многих случаях может аппроксимироваться Гауссовой кривой

$$K(\omega) = K_0 \exp \left[-\alpha \left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где K_0 — усиление на средней частоте;

$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ — рабочая полоса тракта;

ω_1, ω_2 — границы полосы;

ω_0 — центральная частота.

Резкий спад усиления за пределами рабочей полосы кольца позволяет установить режим работы рециркулятора с усилением на центральной частоте $K_{cp} > 1$ без нарушения устойчивости схемы. Будем анализировать случай симметричной неравномерности $\pm\Delta$ коэффициента усиления в полосе $\Delta\omega$; на краях полосы имеем $K(\omega_1, \omega_2) = 1 - \Delta$, на средней частоте $K(\omega_0) = 1 + \Delta$.

Тогда (1) преобразуется к виду

$$K(\omega) = (1 + \Delta) \exp \left[4 \ln \frac{1 - \Delta}{1 + \Delta} \left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Частота каждого из отрезков сигнала длительностью T , циркулирующих в кольце, принимает последовательно дискретные значения $\omega = \omega_1; \omega_1 + \Omega; \omega_1 + 2\Omega$, и т. д.

При этом частотная характеристика кольца может быть заменена решетчатой функцией

$$K(m) = (1 + \Delta) \exp \left[4 \ln \frac{1 - \Delta}{1 + \Delta} \left(\frac{2m - N}{2N} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где N — максимальное число циркуляций в рабочей полосе $\Delta\omega = N\Omega$, $m = 1, 2, 3 \dots N$.

Амплитуда сигнала, n раз циркулирующего в кольце, определяется выражением

$$U(n) = (1 + \Delta)^n \exp \left[4 \ln \frac{1 - \Delta}{1 + \Delta} \sum_{m=1}^n \left(\frac{m}{N} - \frac{1}{2} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

$$n \leq N$$

Амплитуда выходного импульса может быть вычислена как сумма взвешенных амплитуд N отрезков входного сигнала

$$E(N) = \sum_{n=1}^N (1 + \Delta)_n \exp \left[4 \ln \frac{1 - \Delta}{1 + \Delta} \sum_{m=1}^n \left(\frac{m}{N} - \frac{1}{2} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены графики, изображающие амплитудное распределение суммируемых отрезков входного сигнала для $\Delta = 0,03$, $N = 100$ (1); $\Delta = 0,07$, $N = 32$ (2); $\Delta = 0,03$, $N = 32$ (3) для случая симметричной неравномерности частотной характеристики и $\Delta = 0,07$, $N = 32$ (4) — несимметричной неравномерности.

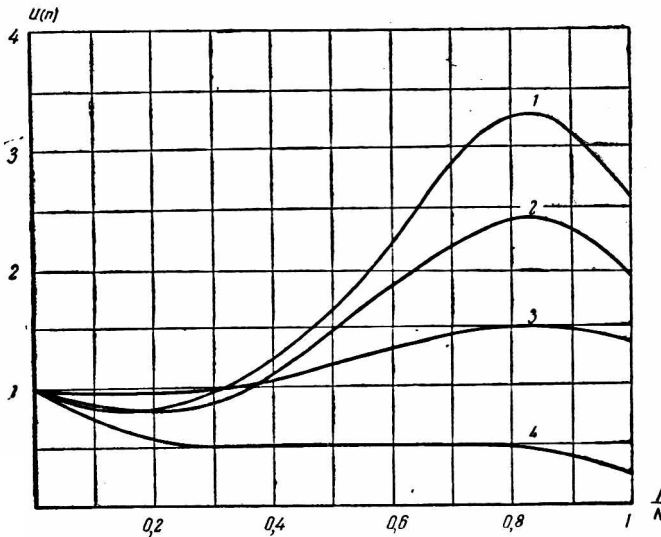


Рис. 2. Распределение амплитуд суммируемых отрезков входного сигнала для различного числа циркуляций N и различной неравномерности частотной характеристики Δ :

симметричная неравномерность: 1 — $\Delta = 0,03$; $N = 100$
 2 — $\Delta = 0,07$; $N = 32$; 3 — $\Delta = 0,03$; $N = 32$; несимметричная неравномерность: $\Delta = 0,07$; $N = 32$.

Из графиков следует, что выбор режима работы кольца, при котором в некоторой части рабочей полосы усиление больше единицы (симметричная неравномерность частотной характеристики) является целесообразным, так как, не приводя к потере устойчивости системы, позволяет эффективнее использовать рабочую полосу частот (сравнить кривые 3 и 4).

Функции распределения в этом случае имеют на интервале $1 < n < N$ экстремумы. Положение последних совпадает со значениями n_1 и n_2 , при которых $K(n) = 1$. Значения n_1 и n_2 могут быть найдены из уравнения

$$\exp \left\{ \ln(1 + \Delta) + \ln \frac{1 - \Delta}{1 + \Delta} \left[\frac{4n^2}{N^2} - \frac{4n}{N} + 1 \right] \right\} = 1, \quad (6)$$

откуда

$$n_{1,2} = \frac{N}{2} \left(1 \mp \sqrt{-\frac{\ln(1 + \Delta)}{\ln\left(\frac{1 - \Delta}{1 + \Delta}\right)}} \right).$$

При малых значениях Δ $n_1 = 0,15N$; $n_2 = 0,85N$.

Допустимые искажения в рабочей полосе при заданном числе циркуляций можно охарактеризовать отношением экстремальных значений функции распределения

$$\frac{U(n_2)}{U(n_1)} \leq \lambda. \quad (7)$$

При известной неравномерности частотной характеристики выражение (7) позволяет оценить достижимое число циркуляций сигнала.

Сравнивая графики (3) и (1), видим, что увеличение числа циркуляций при заданной неравномерности частотной характеристики кольца приводит к быстрому росту отношения (7). В результате эффективное число циркуляций может оказаться меньше расчетного.

К аналогичному результату приводит увеличение Δ при неизменном N (графики 3 и 2).

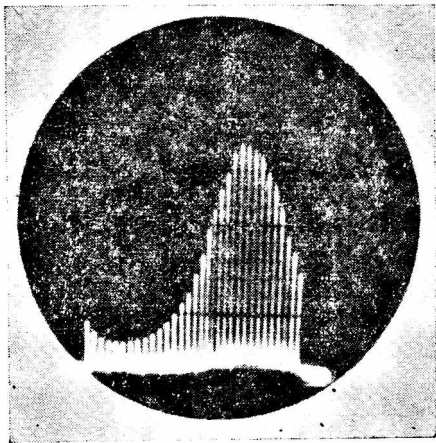


Рис. 3. Осциллограмма функций распределения для значений $N = 32$; $\Delta = 0,1$.

каторе кривую распределения.

На рис. 3 представлена фотография функции распределения для $N = 32$, $\Delta = 0,1$.

Полученные результаты могут быть использованы при рассмотрении вопроса об искажении формы отклика за счет влияния реальных характеристик кольца. Это особенно важно при анализе импульсных сигналов, когда необходимо очень точно воспроизвести тонкую структуру отклика [3].

Основываясь на выводах работы [3], можно считать допустимыми значения $\lambda = 2 - 3$. Из графиков рис. 2 следует, что в этом случае реализация эффективного числа циркуляций $N = 30 - 100$ необходимо обеспечивать равномерность частотной характеристики в полосе $\Delta\omega = N \frac{2\pi}{T}$ меньше 3—5%, что является достаточно жестким требованием.

Функции распределения для колокольной частотной характеристики кольца наблюдались экспериментально. Для этого одновременно с импульсом строба, поступающим с генератора строб-импульсов (рис. 1) для отпираания кольца на время $t = NT$, на вход рециркулятора подавался одиночный короткий радиоимпульс, который совершал затем N циркуляций в кольце, вычерчивая на индикаторе

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Соловьев, С. С. Свиридов. Новые методы спектрального анализа сигналов (обзор). «Зарубежная радиоэлектроника», 1961, № 8.
2. В. А. Хорунжий и др. Применение несевой обработки сигнала в спектроанализаторе с синфазным накоплением. Вестник Харьковского политехнического института, «Радиотехника» 22(70), вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков.
3. В. А. Хорунжий, В. А. Письменецкий. О погрешностях измерения амплитудного спектра радиоимпульсов анализатором с синфазным накоплением. Сб. «Радиотехника», вып. 12. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
4. А. В. Зеленков. Экспериментальное исследование анализатора спектра рециркуляционного типа. Сб. № 2. Труды РИИГА, вып. 99, 1967.