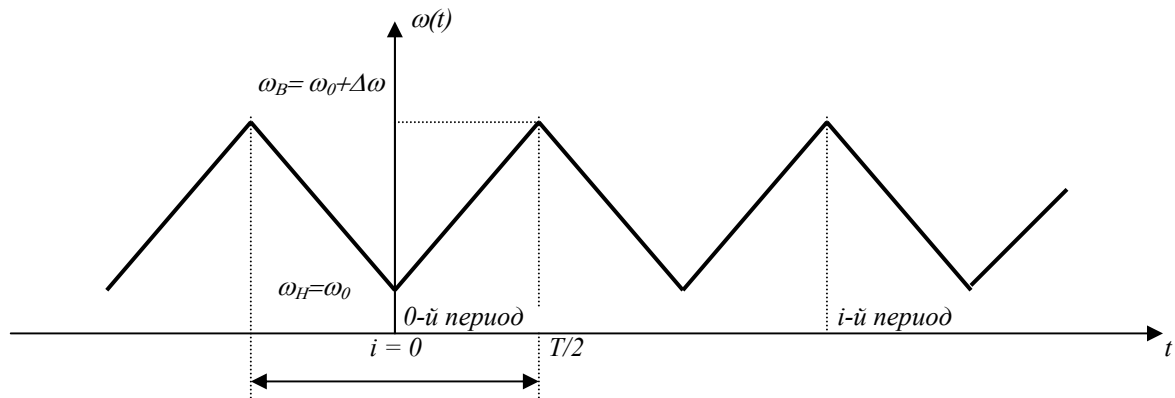


В последние годы ЧМ-радиодальномеры с непрерывным излучением нашли ряд эффективных промышленных применений в качестве высокоточных резервуарных уровнемеров. Поскольку современные требования к точности подобных приборов находятся в пределах единиц и даже долей миллиметров, то это обстоятельство вынуждает разработчиков искать новые пути совершенствования аппаратуры и минимизации погрешностей измерения.

Одним из путей повышения точности ЧМ-радиодальномеров является способ «сшивания» фрагментов сигнала разностной частоты (СРЧ) за счет устранения скачков фазы, возникающих при переходах процесса линейного качания частоты зондирующего сигнала с восходящего участка на нисходящий и наоборот [1]. Это позволяет компенсировать дискретную ошибку измерения за счет увеличения длительности обрабатываемых измерительных сигналов, осуществлять их узкополосную фильтрацию для подавления помех и шумов. Однако существующие реализации подобных приборов, выполненные преимущественно на элементах аналоговой схемотехники, не способны обеспечивать требуемой точности «сшивания» СРЧ в широком диапазоне частот, подвержены сильному влиянию температуры окружающей среды, в том числе и из-за использования в качестве формирователя зондирующего сигнала простого автогенератора с варикапом.

Существенное улучшение процесса «сшивания» получено при реализации тракта формирования зондирующего сигнала ЧМ-радиодальномера на основе цифрового синтезатора частот (ЦСЧ), управляемого схемой ЦОС с непрерывной обработкой спектра СРЧ. При этом структурно ЦСЧ представляет собой комбинацию DDS и PLL-синтезаторов (прямого цифрового синтеза и с системой ФАПЧ), первый из которых формирует опорный ВЧ-сигнал с симметричным линейным качанием частоты, а второй – выполняет функцию умножителя частоты, переносящего опорный сигнал в СВЧ-диапазон [2, 3].

Рассмотрим принцип образования СРЧ для треугольного закона качания частоты (рис. 1).



Учитывая, что для реально измеряемых расстояний в резервуарах задержка эхо-сигнала много меньше длительности периода модуляции, сигнал разностной частоты можно записать в виде

$$U_{СРЧ} = U_0 \cos[\omega_0 \tau + 2\Delta\omega(t/T - i)\tau - \varphi_{МАТ}] - \text{восходящий участок } iT \leq t \leq (i + 0,5)T, \quad (1)$$

$$U_{СРЧ} = U_0 \cos[\omega_0 \tau - 2\Delta\omega(t/T - i)\tau - \varphi_{МАТ}] - \text{нисходящий участок } (i + 0,5)T \leq t \leq iT,$$

где $\varphi_{МАТ}$ - фаза коэффициента отражения от материала; $i = 0, 1, 2 \dots N$; $\tau = 2R/C$, $\varphi_{МАТ}$ - время задержки и фаза эхо-сигнала относительно зондирующего; $\omega_0, \Delta\omega$ - нижняя частота и диапазон качания частоты.

Отсюда следует, что для «сшивания» СРЧ, нижнюю ω_n и верхнюю ω_g частоты зондирующего сигнала следует выбирать в соответствии со следующими соотношениями

$$\omega_n = \frac{n\pi + \varphi_{МАТ}}{\tau}, \quad \omega_g = \omega_n + \Delta\omega = \frac{(m + n)\pi + \varphi_{МАТ}}{\tau}. \quad (2)$$

При выполнении этих условий, в СРЧ в «зонах обращения» скачков фазы не будет и измерительный сигнал будет иметь вид непрерывной синусоиды. В последнем выражении m и n - числа натурального ряда, причем m - соответствует целому числу полупериодов СРЧ.

Указанный алгоритм работы ЧМ-радиодальномера обеспечивается схемой ЦОС, выполненной на сигнальном процессоре. Схема ЦОС производит спектральную обработку СРЧ и на основании ее результатов вырабатывает коды управления DDS-синтезатором, осуществляя адаптацию параметров модуляции зондирующего колебания.

Проанализируем возможность уменьшения погрешности измерения расстояния при спектральном способе оценки. Определим спектр «сшитого» сигнала

$$S(j\Omega) = \int_{-NT}^{NT} u(t)e^{-j\Omega t} dt. \quad (3)$$

После преобразований можно получить удобную для анализа форму записи спектра СРЧ

$$S(\Omega) = \frac{T}{2} \frac{\sin(2N+1)\Omega \frac{T}{2}}{\sin \Omega \frac{T}{2}} U_0 \left\{ \frac{\sin(\Omega_B - \Omega) \frac{T}{4}}{(\Omega_B - \Omega) \frac{T}{4}} \cos \left[\Phi_M + (\Omega_B - \Omega) \frac{T}{4} \right] + \frac{\sin(\Omega_B + \Omega) \frac{T}{4}}{(\Omega_B + \Omega) \frac{T}{4}} \cos \left[\Phi_M + (\Omega_B + \Omega) \frac{T}{4} \right] \right\} = \frac{TU_0}{2} S_M(\Omega) S_{PH}(\Omega). \quad (4)$$

где $\Phi_M = \omega_0 \tau - \varphi_{MAT}$, $\Omega_B = 2\Delta\omega\tau/T$. В выражении (4) множитель

$$S_M(\Omega) = \frac{T}{2} \frac{\sin(2N+1)\Omega \frac{T}{2}}{\sin \Omega \frac{T}{2}}, \quad (5)$$

представляет собой спектральный множитель пачки импульсов. При $\Phi_M = n2\pi$ множитель спектра СРЧ на одном периоде модуляции переходит в спектр радиоимпульса длительностью T

$$S_{PH} = \frac{\sin(\Omega_B - \Omega) \frac{T}{2}}{(\Omega_B - \Omega) \frac{T}{2}} + \frac{\sin(\Omega_B + \Omega) \frac{T}{2}}{(\Omega_B + \Omega) \frac{T}{2}}.$$

Если выполнить полную «сшивку», то $\Omega_B T/2 = 2\pi n$, тогда

$$\sin \left[(\Omega_B \pm \Omega) \frac{T}{2} \right] = \pm \sin \Omega \frac{T}{2},$$

т.е. спектр «сшитого» сигнала совпадает со спектром косинусоидального радиоимпульса длительностью $(2N+1)T$.

При дискретной записи сигнала и его цифровой обработке возникает погрешность оценки расстояния за счет дискретизации спектра. Характерная особенность «сшитого» сигнала заключается в том, что максимум спектральной плотности совпадает со спектральной линией преобразования Фурье, в результате чего отсутствует дискретная (методическая) погрешность. Роль операции «сшивки» заключается также и в том, что возникает возможность определения фазы коэффициента отражения от зондируемого материала, которую можно вычислить, используя выражения (2).

Алгоритм адаптации, реализуемый в сигнальном процессоре, является итерационным. Первоначальные параметры определяются на основании грубых измерений, после чего производится последовательное уточнение величины τ . Процессор каждый раз вырабатывает код управления 48-разрядным DDS, обеспечивающим дискретность переключения значений нижней и верхней частот диапазона качания с шагом в несколько герц, что обеспечивает высокую точность подбора требуемых параметров зондирующего сигнала радиодальномера.

В качестве критерия адаптации приняты симметрия спектра СРЧ и его максимальное значение на центральной частоте, определяемые с использованием стандартной процедуры БПФ или ДПФ. Адаптивное регулирование осуществляется в два этапа.

На первом этапе вычисляется спектр СРЧ, полученный за полупериод модуляции, определяется его центральная частота и по этой частоте вычисляется расстояние до зондируемого материала и количество минимальных интервалов расстояния, укладывающихся на этом расстоянии (в качестве минимального интервала расстояния берется расстояние, соответствующее одному полупериоду СРЧ). Затем уменьшается начальный частотный диапазон качания до получения целого числа минимальных интервалов расстояния и максимума спектральной составляющей, соответствующих измеряемому расстоянию. На втором этапе производится вычисление спектра СРЧ, полученного на нескольких периодах модуляции. Затем изменяется центральная частота зондирующего сигнала (с сохранением диапазона качания). После достижения симметрии спектра производится точное измерение его центральной частоты, вычисление уточненного расстояния и определение фазы коэффициента отражения от зондируемого материала.

Указанный принцип был реализован в макете ЧМ-радиодальномера 3-см диапазона. Экспериментальные исследования прибора показали возможность существенного улучшения точности измерений.

Приводятся и обсуждаются конкретные результаты стендовых испытаний макета прибора.

Л и т е р а т у р а

1. Атаянц Б.А., Болонин В.А., Езерский В.В., Кагаленко Б.В. Адаптивный частотно-модулированный уровнемер // Радиолокация, навигация, связь: Сборник докладов VI международной научно-технической конференции. Том 3. Воронеж: Изд-во ВНИИС, 2000. С. 1686-1696.
2. Атаянц Б.А., Давыдочкин В.М., Езерский В.В., Нагорный Д.Я. Способ измерения расстояния. Заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2003105993 от 04.03.2003.
3. Давыдочкин В.М., Езерский В.В., Нагорный Д.Я. СВЧ-синтезатор частот с высоколинейной широкополосной частотной модуляцией // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов II Международной научно-технической конференции. Самара: Изд-во «Самарский университет», 2003. С. 164.