

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ ВОЛНОВОДНЫМ УРОВНЕМЕРОМ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ, ВЫЗВАННОЙ НАРАСТАНИЕМ ОСАДКОВ НА СТЕНКАХ ВОЛНОВОДА

Давыдошкин В.М., к.т.н., начальник отдела СВЧ устройств и антенн ООО предприятие «КОНТАКТ-1», e-mail: skb@kontakt-1.ru;

Давыдошкина С.В., к.т.н., доцент института академии ФСИН России по кафедре математики и информационных технологий управления, e-mail: dav-sw@yandex.ru;

Езерский В.В., д.т.н., профессор кафедры радиоуправления и связи Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: ezerski@yandex.ru.

DECREASE IN AN ERROR OF MEASUREMENT OF LEVEL OF LIQUID THE WAVEGUIDE LEVEL GAGE WITH FREQUENCY MODULATION, CAUSED BY INCREASE OF RAINFALL ON WAVE GUIDE WALLS

Davydochkin V.M., Davydochkina S.V., Ezerskiy V.V.

The error of measurement of distance the level gage with frequency modulation caused by influence of dispersion of speed of distribution of a signal in a wave guide and uncontrollable increase of rainfall on wave guide walls is considered. Quantitative assessment of size of a possible error is executed. The method of adaptive fine tuning of the level gage to the specified change is offered. Quantitative assessment of achievable effect and influence of noise on error size is executed.

Key words: the frequency waveguide level gage, measurement error, dispersion of speed, draft on wave guide walls.

Ключевые слова: частотный волноводный уровнемер, погрешность измерения, дисперсия скорости, осадки на стенках волновода.

Введение

Во многих отраслях промышленности, при организации контроля и управления технологическими процессами, актуальной является задача измерения уровня жидкости в различных резервуарах. Решение этой задачи с использованием радиодальномеров с частотной модуляцией (ЧМ) сигнала привлекает всё большее внимание из-за потенциально высокой точности измерений. С учётом известной высоты установки радиодальномера уровень жидкости определяется по измеренному расстоянию до неё, однозначно связанного с разностной частотой Ω на выходе смесителя.

В сложной помеховой обстановке, измерения выполняют внутри вертикально установленного полого волновода, в который свободно поступает жидкий контролируемый продукт через перфорационные отверстия до уровня, равного уровню жидкости в резервуаре. Традиционно такие уровнемеры классифицируются, как волноводные [1]. Для уровнемеров с частотной модуляцией важнейшим требованием является точность измерения разностной частоты Ω сигнала на выходе смесителя, однозначно связанной с расстоянием в волноводе $L_{\text{в}}$ до поверхности жидкости. Однако на погрешность измерения негативно влияет зависимость скорости распространения электромагнитных волн в волноводе от частоты – частотная дисперсия, а также изменение скорости распространения электромагнитных волн из-за постепенного отложения на стенках волновода малопо-

Рассматривается погрешность измерения расстояния уровнемером с частотной модуляцией, вызванная влиянием дисперсии скорости распространения сигнала в волноводе и неконтролируемым нарастанием осадков на стенках волновода. Выполнена количественная оценка величины возможной погрешности. Предложен метод адаптивной подстройки уровнемера к указанному изменению. Выполнена количественная оценка достижимого эффекта и влияния шума на величину погрешности.

движных фракций контролируемого вещества, приводящего к изменению диэлектрической проницаемости среды в волноводе.

Цель работы. Уменьшение погрешности измерения уровня волноводным уровнемером, вызванной вариацией скорости распространения электромагнитных волн вследствие изменения диэлектрической проницаемости среды в антенно-волноводном тракте (АВТ).

Влияние дисперсии и диэлектрической проницаемости среды заполняющей волновод на сигнал разностной частоты

Для волноводных уровнемеров с постоянным сечением волновода по всей длине $L_{\text{в}}$, заполненного однородной средой с диэлектрической проницаемостью ε , математическую модель сигнала разностной частоты (СРЧ) можно представить в виде [2]

$$u(t) = U(t) \cos[2\omega(t)L_{\text{в}}\sqrt{\varepsilon - \omega_{\text{кр}}^2}/\omega^2(t)/c - \varphi], \quad (1)$$

где $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega t/T$ – текущая частота зондирующего сигнала; T – интервал времени с линейным нарастанием частоты; $\Delta\omega$ – диапазон частотной модуляции; $\omega_{\text{кр}}$ – критическая частота волновода; c – скорость рас-

пространения волн в свободном пространстве; L_B – геометрическая длина волновода от уровнемера до поверхности жидкости, φ – фаза коэффициента отражения от жидкости, заполняющей волновод, которую в дальнейшем будем считать равной нулю; $U(t)$ – функция, характеризующая паразитную амплитудную модуляцию (ПАМ) СРЧ, включающая ПАМ генерируемого сигнала, амплитудно-частотную характеристику отражающего объекта и частотно-зависимое затухание электромагнитных волн в волноводе.

Для анализа влияния отложений и изменения диэлектрической проницаемости газа $\varepsilon_{\text{газ}}$ над поверхностью контролируемого материала считаем, что на внутренней поверхности волновода радиуса R_B равномерно распределён слой диэлектрика, толщиной ΔR_B , с известным значением относительной диэлектрической проницаемости ε , настолько тонкий, что не вызывает изменения типа волн в волноводе. На основе известных результатов [3] такое предположение позволяет определить относительную эквивалентную диэлектрическую проницаемость диэлектрика $\varepsilon_{\text{экв}}$, при полном заполнении волновода которым, постоянная распространения в заполненном волноводе будет равна постоянной распространения в волноводе с тонким слоем диэлектрика $\varepsilon_{\text{экв}} = \varepsilon_{\text{газ}} \varepsilon / [\varepsilon - \Delta R_B / R_B (\varepsilon - \varepsilon_{\text{газ}})]$, (2) где $\varepsilon_{\text{экв}}$ – эквивалентная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей волновод над жидкостью, учитывающая диэлектрическая проницаемость газа $\varepsilon_{\text{газ}}$.

В дальнейшем целесообразно использовать нормированную частоту x_L , совпадающую с нормированным расстоянием [2], связанную с разностной частотой СРЧ F_p и расстоянием L_B $x_L = F_p T = 0,5 \Omega_p T / \pi = \Delta \omega \tau_L / 2\pi = \Delta \omega L_B / c \pi$, (3) где $\Omega_p = 2\pi F_p$; τ_L – время распространения электромагнитных волн в волноводе.

Тогда нормированная текущая частота и нормированное текущее расстояние $x = FT = 0,5 \Omega T / \pi = \Delta \omega \tau / 2\pi = \Delta \omega L / c \pi$. (4)

При использовании (1)-(3) мгновенную и среднюю нормированные разностные частоты волноводного уровнемера [2] можно представить в виде:

$$x(t_H) = x_L \varepsilon_{\text{экв}} (1 + a \cdot t_H) / \sqrt{\varepsilon_{\text{экв}} (1 + a \cdot t_H)^2 - b^2}, \quad (5)$$

$$x_{\text{ср}} = \frac{x_L}{a} \left[\sqrt{\varepsilon_{\text{экв}} (1 + a)^2 - b^2} - \sqrt{\varepsilon_{\text{экв}} - b^2} \right], \quad (6)$$

где $a = \Delta \omega / \omega_{\text{мин}}$ – нормированный диапазон перестройки частоты; $\omega_{\text{мин}}$ – минимальная частота диапазона; $b = \omega_{\text{кр}} / \omega_{\text{мин}}$ – нормированная критическая частота волновода; $t_H = t / T$ – нормированное время.

Обычно в частотном дальномере производится измерение средней разностной частоты и вычисление по ней измеряемого расстояния [1]. Из (6) видно, что неконтролируемое изменение $\varepsilon_{\text{экв}}$ существенно изменяет сред-

нюю разностную частоту, и, следовательно, приводит к большой погрешности измерения расстояния. Наглядное представление о величине возникающей погрешности даёт рис. 1, где приведены результаты моделирования процесса измерения расстояния с помощью известного двухэтапного алгоритма на основе модифицированного преобразования Фурье [2], учитывающего влияние волновода, но не учитывающего изменение эквивалентной диэлектрической проницаемости.

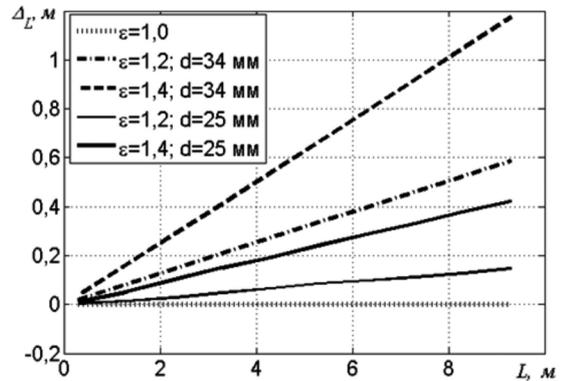


Рис. 1. Зависимость погрешности измерения расстояния в волноводе при двух значениях диэлектрической проницаемости и двух диаметрах волновода

Моделирование производилось для несущей частоты $f_0 = 8,5$ ГГц, диапазона перестройки частоты $\Delta f = 3$ ГГц, трёх значений эквивалентной диэлектрической проницаемости и двух значений диаметра волновода 25 мм и 34 мм. При моделировании вычисление преобразования Фурье выполнялось с использованием весовой функции [4]

$$w(t_H) = 1 - \frac{\sin[M_0(b_1 + 1)] \sin[M_0(b_1 - 1)]}{\cos(M_0) [\sin(M_0 b_1)]^2} \times \cos \left[2\pi \frac{\sqrt{\varepsilon(1 + at_H)^2 - b^2} - \sqrt{\varepsilon - b^2}}{\sqrt{\varepsilon(1 + a)^2 - b^2} - \sqrt{\varepsilon - b^2}} \right], \quad (7)$$

где b_1 – параметр формы весовой функции, который был равен 200; $M_0 = \pi / M$; $\varepsilon = 1$.

Видно, что отсутствие изменения эквивалентной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_{\text{экв}} = 1,0$) не вызывает изменения погрешности (точечная горизонтальная линия).

Изменение эквивалентной диэлектрической проницаемости приводит к существенной погрешности измерения расстояния, которая увеличивается с увеличением расстояния и увеличением значения $\varepsilon_{\text{экв}}$. Если величина $\varepsilon_{\text{экв}}$ отличается от единицы, но не изменяется, то можно эту погрешность устранить с помощью калибровки уровнемера на технологическом стенде. Однако на практике происходит неконтролируемое изменение $\varepsilon_{\text{экв}}$, обусловленное налипанием осадка контролируемого материала на стенки волновода при его периодическом заполнении и опустошении. Поэтому при выполнении таких измерений необходимо каким-либо образом выполнять оценку $\varepsilon_{\text{экв}}$ и учитывать полученный результат при измерении разностной частоты.

Метод оценки изменения эквивалентной диэлектрической проницаемости

На рис. 2 приведены зависимости нормированных мгновенных разностных частот СРЧ $x(t_n)/x_L$, от нормированного времени, полученных по формуле (5) с использованием волноводов диаметром 25 мм (кривые 1 и 2) и 34 мм (кривые 3 и 4) для эквивалентных относительных диэлектрических проницаемостей заполнения волновода над контролируемой жидкостью $\varepsilon_{\text{эКВ}} = 1$ (кривые 1 и 3) и $\varepsilon_{\text{эКВ}} = 1,3$ (кривые 2 и 4). Диапазон ЧМ – 3 ГГц.

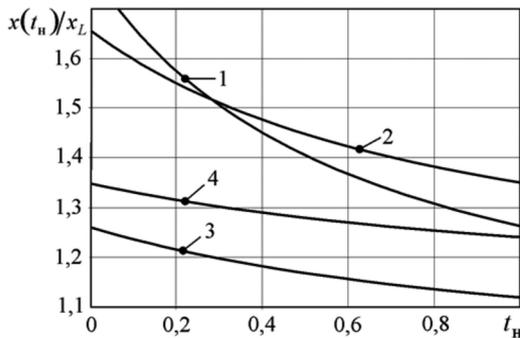


Рис. 2. Зависимости нормированных мгновенных разностных частот СРЧ

Из выражения (5) и приведённого рисунка видна однозначная связь зависимости мгновенной разностной частоты с эквивалентной диэлектрической проницаемостью заполнения волновода над контролируемой жидкостью, параметрами ЧМ и поперечным сечением волновода. Такие зависимости можно использовать для оценки текущей эквивалентной проницаемости заполнения волновода. Для этого необходимо по измеренному СРЧ оценить зависимость $x_{\text{изм}}(t_n)$ мгновенной разностной частоты сигнала от времени в интервале T , нормированной к средней разностной частоте $x_{\text{ср}}_{\text{изм}}$:

$x_{\text{изм,н}}(t_n) = x_{\text{изм}}(t_n)/x_{\text{ср}}_{\text{изм}}$. Эту зависимость необходимо сравнивать с нормированной эталонной зависимостью от времени частоты разностного сигнала $x_{\text{эт}}(t)$, отнесённой к эталонной средней разностной частоте, определённой на основе (5), (6) выражением

$$x_{\text{этн}}(t_n) = \frac{x_{\text{эт}}(t_n)}{x_{\text{этср}}} = \frac{\varepsilon_{\text{эт}} a (1 + a \cdot t_n)}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эт}} (1 + a \cdot t_n)^2 - b^2} \cdot \left[\sqrt{\varepsilon_{\text{эт}} (1 + a)^2 - b^2} - \sqrt{\varepsilon_{\text{эт}} - b^2} \right]} \quad (8)$$

При сравнении этих графиков необходимо в выражении (8) варьировать $\varepsilon_{\text{эт}}$ добиваясь совпадения указанных зависимостей. Для устранения влияния случайных погрешностей измерения, искажающих экспериментально полученную зависимость $x_{\text{изм,н}}(t)$, целесообразно вычислять разность этих графиков $\Delta x(t) = x_{\text{изм,н}}(t) - x_{\text{этн}}(t)$ и варьировать $\varepsilon_{\text{эт}}$, до получения минимума модуля максимального значения разности и зафиксировать полученное значение. Можно использовать минимум среднего квадрата указанной разности. При этом относительную диэлектрическую

проницаемость $\varepsilon_{\text{эКВ}}$ среды, заполняющей волновод над жидкостью, следует принять равной найденному значению $\varepsilon_{\text{эт}}$.

На рис. 3 приведены теоретические зависимости разностей $\Delta x(t)$ нормированных частот между графиком, полученным для фактического значения $\varepsilon_{\text{эКВ}} = 1,02$, и эталонным графиком при использовании волновода диаметром 25 мм.

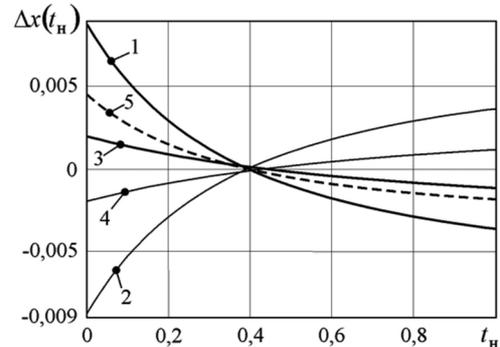


Рис. 3. Зависимости разностей нормированных частот

Зависимость 1 получена при $\varepsilon_{\text{эКВ}} = 1,02$, $\varepsilon_{\text{эт}} = 1,04$ использовании волновода диаметром 25 мм, диапазоне ЧМ $\Delta f = 3$ ГГц, при $f_{\text{мин}} = 8,5$ ГГц. Изменение эталонной относительной диэлектрической проницаемости при её подборе приводит к изменению зависимости разности нормированной мгновенной частоты выделенного сигнала разностной частоты и эталонного сигнала. В приведённом примере изменение $\varepsilon_{\text{эт}}$ с 1,04 до $\varepsilon_{\text{эт}} = 1,03$, снижает максимальное значение $\Delta x(t) = x_{\text{изм,норм}}(t) - x_{\text{эт}}(t)$ с 0,0089 до 0,0045 (линии, соответственно, 1 и 5). При дальнейшем изменении $\varepsilon_{\text{эт}}$ в процессе её подбора снижаются до нуля максимальные значения $\Delta x(t) = x_{\text{изм,норм}}(t) - x_{\text{эт}}(t)$. При нулевом значении $\Delta x(t)$ (в общем случае при минимуме модуля $|\Delta x(t)|$ или среднего квадрата) $\varepsilon_{\text{эКВ}}$, принимается равной $\varepsilon_{\text{эт}}$.

Увеличение диаметра волновода приводит к снижению крутизны изменения зависимости $\Delta x(t)$ (кривая 3) и, как следствие, к уменьшению чувствительности самого метода сравнения с эталонной зависимостью. Зависимость 3 получена при $\varepsilon_{\text{эКВ}} = 1,02$, $\varepsilon_{\text{эт}} = 1,04$, использовании волновода диаметром 34 мм, с диапазоном ЧМ $\Delta f = 3$ ГГц и $f_{\text{мин}} = 8,5$ ГГц.

Снижение крутизны изменения зависимости $\Delta x(t)$ происходит также при уменьшении диапазона частотной модуляции.

Для рассмотренных кривых исходное значение эталонной относительной диэлектрической проницаемости больше эквивалентной диэлектрической проницаемости среды заполняющей волновод $\varepsilon_{\text{эт}} > \varepsilon_{\text{эКВ}}$. Если начальные $\varepsilon_{\text{эКВ}} > \varepsilon_{\text{эт}}$ (4 кривая и 5 кривая) то зависимости возрастающие.

К сожалению, практически измерить зависимость мгновенной разностной частоты от времени сложно, особенно при малом значении x_L .

Наиболее просто реализовать этот метод анализа позволяет цифровое формирование зондирующих сигналов и цифровая обработка СРЧ. При этом используется способ ступенчатого цифрового формирования ЧМ с запоминанием каждого отсчёта СРЧ в массиве на соответствующей ступеньке ЧМ. В результате становится возможным выполнять анализ зависимости дискретного ряда средних разностных частот СРЧ, измеренных для частных подмассивов, полученных разбиением всего массива отсчётов СРЧ. Аналогичный набор эталонных сигналов даёт эталонную зависимость дискретного ряда средних разностных частот СРЧ.

Предполагая цифровые методы формирования зондирующего сигнала и обработки СРЧ, целесообразно ориентироваться на ЧМ с числом ступеней частоты и, соответ-

$$N = \sum_{i=1}^m 2^{n_i}, \text{ где } 2^{n_i} - \text{число}$$

отсчётов в i -м частичном массиве из общего массива отсчётов СРЧ, m – число частичных подмассивов.

Диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей волновод над жидкостью, определяется из результатов сравнения зависимости измеренных средних разностных частот сигнала $\hat{x}_{ср1}, \hat{x}_{ср2}, \dots, \hat{x}_{срm}$ в частичных диапазонах ЧМ $\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_m$ нормированных к средней разностной частоте сигнала, измеренной в полном диапазоне ЧМ $\hat{x}_{срi, \text{норм}} = \hat{x}_{срi} / \hat{x}_{срполн}$, с зависимостью эталонных нормированных средних частот $x_{эсрн1}, x_{эсрн2}, \dots, x_{эсрnm}$, соответствующих тем же диапазонам ЧМ. При этом эталонные нормированные средние частоты $x_{эсрni}$ определены выражением:

$$x_{эсрni} = \frac{a \left[\sqrt{\varepsilon_{экв} (1+a_i)^2 - b_i^2} - \sqrt{\varepsilon_{экв} - b_i^2} \right]}{\left\{ a_i \left[\sqrt{\varepsilon_{экв} (1+a)^2 - b^2} - \sqrt{\varepsilon_{экв} - b^2} \right] \right\}}, \quad (9)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$; $a = \Delta f / f_{мин}$; $a_i = \Delta f_i / f_{мини}$; $b = f_{кр} / f_{мин}$; $b_i = f_{кр} / f_{мини}$, $f_{мини}$ – минимальная частота в i -м поддиапазоне перестройки.

Искомая оценка диэлектрической проницаемости среды, заполняющей волновод над жидкостью $\varepsilon_{экв}$, принимается равной эталонной диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon_{эТ}$, при которой наблюдается минимум суммы

$$\sum_i \left| \hat{x}_{срi, \text{норм}} - x_{эсрni} \right| \Rightarrow \min. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что увеличение числа частичных поддиапазонов приводит к уменьшению величины перестройки частоты Δf_i в частичных поддиапазонах при фиксированном полном диапазоне Δf . В результате увеличивается погрешность оценки $\hat{x}_{срi}$ и, следовательно, оценки $\hat{\varepsilon}_{экв}$.

Метод адаптации волноводного уровнемера к изменению эквивалентной диэлектрической проницаемости среды в волноводе

Предельным упрощением рассмотренного метода анализа зависимости разностной частоты является оценка средних частот в двух частичных поддиапазонах с соответствующим разбиением массива отсчётов СРЧ на два произвольных частичных массива. Для этого случая необходимо измерить средние разностные частоты $\hat{x}_{ср1}, \hat{x}_{ср2}$ СРЧ в двух частичных произвольных

диапазонах ЧМ Δf_1 и $\Delta f_2 = \Delta f - \Delta f_1$. Тогда нормированные параметры ЧМ можно записать в виде

$$a_1 = \frac{\Delta f_1}{f_{мин1}}; a = \frac{\Delta f}{f_{мин}}; a_2 = \frac{\Delta f_2}{f_{мин2}} = \frac{\Delta f_2}{f_{мин} + \Delta f_1} = \frac{a - a_1}{1 + a_1};$$

$$b = \frac{f_{кр}}{f_{мин}} = b_1; b_2 = \frac{b_1}{1 + a_1}.$$

При одинаковых фазах коэффициентов отражения от зондируемой жидкости в отношении средних частот исчезает зависимость от расстояния:

$$K = \frac{\hat{x}_{ср2}}{\hat{x}_{ср1}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{экв} A^2 - b^2} - \sqrt{\varepsilon_{экв} A_1^2 - b^2}}{\sqrt{\varepsilon_{экв} A_1^2 - b^2} - \sqrt{\varepsilon_{экв} - b^2}}. \quad (11)$$

Отсюда можно получить выражение для оценки значения эквивалентной диэлектрической проницаемости заполнения волновода

$$\hat{\varepsilon}_{экв} = - \frac{2b^2 [(K+1)^2 (A^2 - 2KA_1^2 + K^2) + (1-K^2)(K^2 - A^2)]}{(K+1)^2 A_1^2 [A_1^2 (K+1)^2 - 2K^2 - 2A^2] + (K^2 - A^2)^2}, \quad (12)$$

где $A = 1+a$; $A_1 = 1+a_1$.

С использованием полученного $\hat{\varepsilon}_{экв}$ можно вычислить уточнённое значение расстояния \hat{L}_T , по оценке $\hat{x}_{срполн}$, полученной с использованием полного массива записанных отсчётов сигнала в исходном диапазоне перестройки частоты Δf

$$\hat{L}_T = \hat{x}_{срполн} \frac{ca}{2\Delta f} \left[\sqrt{\hat{\varepsilon}_{экв} (1+a)^2 - b^2} - \sqrt{\hat{\varepsilon}_{экв} - b^2} \right]^{-1}. \quad (13)$$

Из известных методов обработки СРЧ для волноводного уровнемера целесообразно использовать модифицированное интегрально-дискретное преобразование Фурье [2]. В данном случае необходимо адаптировать его для оценки разностной частоты с учётом величины эквивалентной и эталонной диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_{экв}$, $\varepsilon_{эТ}$, дискретизации сигнала и сдвига ВФ для исключения асимметрии [5]

$$S_d(x) = \frac{a}{MD} \times \left\{ \begin{aligned} & u(m) w[\varphi(m)] \times \\ & \times \sum_{m=0}^{M-1} \times \frac{\varepsilon_{эТ} [1+a(m+0,5)/M]}{\sqrt{\varepsilon_{эТ} [1+a(m+0,5)/M]^2 - b^2}} \times \\ & \times \exp \left[-j2\pi \frac{x}{D} \sqrt{\varepsilon_{эТ} (1+am/M)^2 - b^2} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где $u(m)$ – отсчёты СРЧ; M – число отсчётов СРЧ в соответствующем частичном диапазоне частот; a и b – соответствующие нормированные параметры ЧМ в частичных диапазонах частот; $D = \sqrt{\varepsilon_{эТ}(1+a)^2 - b^2} - \sqrt{\varepsilon_{эТ} - b^2}$; $\varphi(m) = \left\{ \sqrt{\varepsilon_{эТ}[1+a(m+0,5)/M]^2 - b^2} - \sqrt{\varepsilon_{эТ} - b^2} \right\} / D$; $w[*]$ – весовая функция (7).

Поскольку до проведения измерений измеряемое расстояние и диэлектрическая проницаемость заполнения волновода неизвестны, то процесс их определения должен быть итерационным до снижения абсолютного значения разности между вновь полученным значением нормированной частоты $\hat{x}_R^{(n)}$ и его предыдущим значением $\hat{x}_R^{(n-1)}$ ниже заранее заданной величины Δ_x : $|\hat{x}_R^{(n)} - \hat{x}_R^{(n-1)}| \leq \Delta_x$. В качестве первого приближения можно принять значение $\varepsilon_{эТ} = 1$.

На рис. 4 показаны графики зависимости мгновенной погрешности оценки расстояния, полученные с помощью моделирования указанного процесса адаптации при $\varepsilon_{эКВ} = 1,2$, указанных выше параметрах ЧМ и диаметрах волновода.

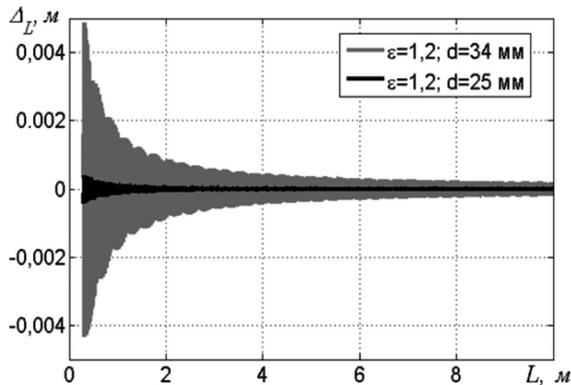


Рис. 4. Зависимость мгновенной погрешности измерения расстояния в волноводе с адаптацией к величине относительной диэлектрической проницаемости

Видно, что с увеличением измеряемого расстояния погрешность уменьшается, как и в свободном пространстве, в волноводе с диаметром 25 мм погрешность примерно на порядок меньше, чем в волноводе с диаметром 34 мм и не превышает 0,5 мм.

Влияние погрешности измерения расстояния и шума на результаты адаптации к изменению величины эквивалентной диэлектрической проницаемости

Существует минимально достижимый уровень погрешности измерения, ограниченный влиянием шума на оценки средних разностных частот. Из выражения (11) следует, что первоначальная погрешность измерения $\Delta\hat{x}_{ср1}$, $\Delta\hat{x}_{ср2}$ средних разностных частот $\hat{x}_{ср1}$, $\hat{x}_{ср2}$ приводит к погрешности оценки их отношения $K_{изМ}$ на величину ΔK ($K_{изМ} = K + \Delta K$), что в свою очередь при-

водит к погрешности оценки $\varepsilon_{эКВ}$ на величину $\Delta\varepsilon_{ш}$.

Очевидно, максимум погрешности определения отношения средних частот ΔK_{max} получается при разных знаках $\Delta\hat{x}_{ср1}$, $\Delta\hat{x}_{ср2}$, следовательно, из-за шума

$$K_{ш} = K + \Delta K_{max} \approx \frac{\hat{x}_{ср1}}{\hat{x}_{ср2}} + \frac{(|\Delta\hat{x}_{ср1}| + |\Delta\hat{x}_{ср2}|)}{(x_L)} = K + \frac{(|\Delta\hat{x}_{ср1}| + |\Delta\hat{x}_{ср2}|)}{(x_L)}$$

Тогда

$$\varepsilon_{эКВ} + \Delta\varepsilon_{ш} = \frac{2b^2[(K_{ш} + 1)^2(A^2 - 2K_{ш}A_1^2 + K_{ш}^2) + (1 - K_{ш}^2)(K_{ш}^2 - A^2)]}{(K_{ш} + 1)^2A_1^2[A_1^2(K_{ш} + 1)^2 - 2K_{ш}^2 - 2A^2] + (K_{ш}^2 - A^2)^2} \quad (15)$$

Отсюда аналитические оценки погрешностей определения относительной диэлектрической проницаемости среды $\Delta\varepsilon_{ш}$ и нормированной частоты $\Delta x_{ср}$ определяются, соответственно, выражениями

$$\Delta\varepsilon_{ш} = \frac{2b^2[(K + 1)^2(A^2 - 2KA_1^2 + K^2) + (1 - K^2)(K^2 - A^2)]}{(K + 1)^2A_1^2[A_1^2(K + 1)^2 - 2K^2 - 2A^2] + (K^2 - A^2)^2} - \frac{2b^2[(K_{ш} + 1)^2(A^2 - 2K_{ш}A_1^2 + K_{ш}^2) + (1 - K_{ш}^2)(K_{ш}^2 - A^2)]}{(K_{ш} + 1)^2A_1^2[A_1^2(K_{ш} + 1)^2 - 2K_{ш}^2 - 2A^2] + (K_{ш}^2 - A^2)^2} \quad (16)$$

$$\Delta x_{ср} = \frac{x_L}{a} \left[\frac{\sqrt{(\varepsilon_{эКВ} + \Delta\varepsilon_{ш})(1+a)^2 - b^2} - \sqrt{(\varepsilon_{эКВ} + \Delta\varepsilon_{ш}) - b^2} - \sqrt{\varepsilon_{эКВ}(1+a)^2 - b^2} + \sqrt{\varepsilon_{эКВ} - b^2}}{\dots} \right] \quad (17)$$

Для оценок верхней границы такой погрешности можно использовать результаты расчёта достижимой погрешности на фоне шума и помех, приведённые в [6] ($\Delta\hat{x}_{ср1} \approx 0,5q_{сш}^{-1}$), из которых следует, что при разной полярности $\Delta\hat{x}_{ср1}$, $\Delta\hat{x}_{ср2}$ относительная величина погрешности оценки отношения K составит $\Delta K_{max} \approx 1/(q_{сш}x_L)$.

На рис. 5 приведены зависимости максимальной погрешности до поверхности жидкости в волноводе, удалённой на 15 метров, от изменения эквивалентной диэлектрической проницаемости заполнения волновода $\Delta\varepsilon$ над контролируемой жидкостью при различных отношениях сигнал-шум для волноводов диаметром 25 мм и диапазона ЧМ 3 ГГц (сплошные кривые) и 34 мм и диапазона ЧМ 1 ГГц (пунктирные кривые).

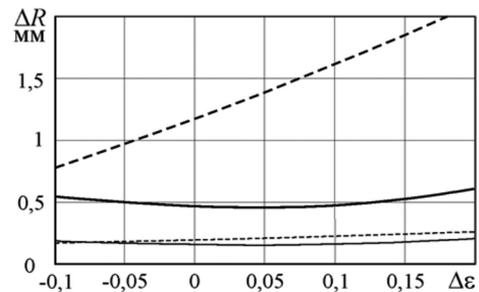


Рис. 5. Зависимости максимальных значений погрешностей измерений расстояния в волноводе

При расчёте использован исходный уровень погрешности, обусловленной шумом, соответствующий отношениям сигнал-шум $q_{\text{сш}} = 40$ дБ (жирные сплошная и пунктирная кривые), $q_{\text{сш}} = 50$ дБ (сплошная тонкая кривая) и $q_{\text{сш}} = 60$ дБ (тонкий пунктир).

Из полученных аналитических выражений и графиков следует, что погрешность оценки расстояния при одновременном изменении диэлектрической проницаемости заполнения волновода $\Delta\varepsilon$ над контролируемой жидкостью и наличии шума, в 3 ÷ 5 раз превышает шумовую составляющую погрешности.

Условия эксплуатации уровнемера и известность электрофизических параметров контролируемой жидкости позволяют заранее определить относительную диэлектрическую проницаемость ε слоя возможных осадков. В этом случае использование (2), результатов оценки $\hat{\varepsilon}_{\text{экв}}$ и изменения $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{экв}} - \varepsilon_{\text{экв}0}$ позволяют, при необходимости оценить толщину слоя осадков ΔR_B на внутренней поверхности волновода с радиусом R_a

$$\Delta R_B / R_B \approx \varepsilon \Delta \varepsilon / [(\varepsilon - \varepsilon_{\text{газ}})(\varepsilon_{\text{газ}} + \Delta \varepsilon)], \quad (18)$$

при котором погрешность измерения не превышает допустимой величины. Допустимая величина отложений не зависит от диапазона ЧМ, а определяется только допустимой погрешностью измерения Δx и, соответственно, допустимым изменением $\Delta\varepsilon$. При эксплуатации уровнемера нет необходимости оценивать толщину слоя осадков. Достаточно определить предельно допустимое значение $\varepsilon_{\text{экв}}$ для профилактического обслуживания уровнемера.

Представляет интерес вопрос о возможности адаптации к изменению $\varepsilon_{\text{экв}}$ при наличии шума. На рис. 6 приведены результаты моделирования процесса адаптации при разных уровнях шума в условиях, соответствующих рис. 4. Сплошные линии – диаметр волновода 25 мм, штриховые линии – диаметр волновода 34 мм.

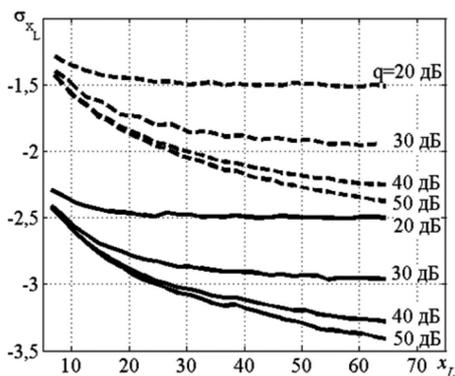


Рис. 6. Зависимость погрешности измерения от измеряемого расстояния и уровня шума при адаптации к величине эквивалентной диэлектрической проницаемости

При моделировании на каждом заданном расстоянии до уровня жидкости в волноводе к сформированному по (1) сигналу добавлялся белый нормальный шум. Для оценки величины эквивалентной диэлектрической проницаемости использовалось разбиение исходного массива из 1024 отсчётов СРЧ на два подмассива по

512 отсчётов. После этого выполнялся процесс адаптации в соответствии с описанной выше процедурой, и находилась погрешность измерения расстояния. На каждом моделируемом расстоянии последовательно добавлялось по 50 реализаций шума. Затем производилась оценка среднеквадратического отклонения результата измерения, и эта оценка усреднялась на отрезке расстояния, равном элементу разрешения ЧМ дальномера.

Видно, что наличие шума не мешает процессу адаптации к уровню эквивалентной диэлектрической проницаемости. При уровне шума примерно 50 дБ его влиянием можно полностью пренебречь. Однако даже при уровне шума 20 дБ уровень достигаемой погрешности соответствует практическим требованиям к уровнемерам. Причём в волноводе с диаметром 25 мм погрешность примерно на порядок меньше, чем в волноводе с диаметром 34 мм.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Наличие дисперсии и отложений осадков в волноводном тракте приводит к возникновению дополнительной погрешности измерения расстояния, которая существенно превышает допустимые требования к практическим приборам.

2. Разработанный метод адаптации к изменению диэлектрической проницаемости среды в волноводе, вызванной наличием осадков на стенках волновода, снижает погрешность в десятки раз в зависимости от величины этого изменения.

3. Адаптация к изменению диэлектрической проницаемости успешно выполняется при наличии шума с уровнем менее минус 20 дБ.

4. Существует зависимость уровня достижимой погрешности от соотношения длины волны используемого сигнала и критической длины волны волновода, однако детальное изучение этого явления выходит за рамки данной статьи.

Литература

1. Жданкин В.К. Измерение уровня посредством направленного электромагнитного излучения // Современные технологии автоматизации. 2004. № 4. С. 6-14.
2. Давыдочкин В.М. Преобразование Фурье в задаче измерения расстояния частотным дальнометром в пространстве с дисперсией // Цифровая обработка сигналов. – 2015. – № 1. – С. 66-70.
3. Справочник по волноводам. Под редакцией проф. Я.Н. Фельда. Перевод с английского. Издательство «Советское радио» Москва – 1952. 432 с.
4. Давыдочкин В.М., Давыдочкина С.В. Весовые функции для цифрового адаптивного гармонического анализа сигналов с многомодовым спектром // Радиотехника. 2009. № 9. С. 11-22.
5. Давыдочкин В.М., Давыдочкина С.В., Езерский В.В. Снижение методической и шумовой погрешностей в задаче оценки частоты отрезка гармонического сигнала // Радиотехника. 2015. № 11, С. 66-71.
6. Давыдочкин В.М., Езерский В.В., Влияние помех на погрешность радиолокационных уровнемеров с частотной модуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 30-37.