

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ: МИКРОВОЛНЫ ИЛИ УЛЬТРАЗВУК?

А.Н. Крошкин (ООО "Эндресс+Хаузер")

Компания Endress+Hauser использует девять физических принципов измерения и детектирования уровня от вибрационного¹ и до гамма-излучения. Рассмотрим наиболее современные измерители уровня микроволнового и ультразвукового принципа действия. Эти приборы за схожесть принципа действия мы называем общим термином ToF-приборы (Time of Flight – время пролета). Они используют в своей работе принцип измерения времени распространения сигнала до поверхности среды и обратно.

Обзор продуктовой линейки ToF-уровнемеров компании Endress+Hauser

Практически по всем видам измерений компания Endress+Hauser реализует в своей продуктовой линейке так называемую TMS-стратегию, определяющую способ сегментации приборного ряда по функциональности и соответственно по цене. Самый простой – это Т-класс. Эти датчики имеют, как правило, невысокую точность, фиксированный диапазон настройки, у них отсутствует взрывозащищенное исполнение, цифровые коммуникации и т.п. Средний М-класс реализует базовые точностные характеристики и базовую функциональность, он удовлетворяет требованиям большей части промышленных применений. И, наконец, самый верхний уровень представлен S-классом, который, как правило, сочетает наивысший на сегодняшний день уровень точности и максимальную функциональность. Этот класс приборов находит применение в системах коммерческого учета, а также при экстремальных условиях процесса (давление, температура и т.п.). Условно TMS-стратегию можно изобразить на плоскости "функциональность-цена" (рис. 1).

Рассмотрим реализацию данной стратегии на классе ToF-приборов. К этому классу мы относим ультразвуковые уровнемеры Prosonic, микроволновые уровнемеры (радары) Micropilot, а также микроимпульсные уровнемеры (направляемые радары) Levelflex. Ультразвуковые уровнемеры выпускаются во всех трех классах: Prosonic T, Prosonic M и Prosonic S, радары Micropilot – в М и S классах, а флекс-радар Levelflex – только в М-классе. Представители М-класса: Prosonic M, Micropilot M и Levelflex M образуют базовую группу

ToF-уровнемеров (рис.1). В рамках этой группы достигнута максимально возможная унификация приборов. Все представители М-класса имеют одинаковые корпуса и модуль управления (дисплей), ряд общих электронных компонентов, схожую структуру программирования, практически идентичное меню быстрой настройки "Quick Setup", единый пакет сервисного ПО ToFTool. Степень унификации приборов М-класса можно оценить уже по их внешнему виду (рис. 2, 3, 4 и цветная вставка Endress+Hauser). Все ToF-уровнемеры М-класса находятся примерно в одной ценовой категории. При этом существует целый ряд практических измерительных задач, которые могут быть решены как одним, так и другим инструментом. В этой связи особенно актуален вопрос выбора оптимального устройства, наибольшим образом соответствующего специфике применения: рабочей среде, параметрам процесса и окружающей среды, конструктивным особенностям, дополнительным требо-

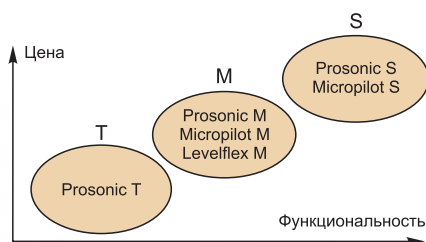


Рис. 1. Продуктовая стратегия TMS



Рис. 2. Микроволновый уровнемер Micropilot M FMR240



Рис. 3. Ультразвуковой уровнемер Prosonic M FMU40



Рис. 4. Микроимпульсный уровнемер Levelflex M FMP40

¹ Лопатин С.С., Пфайффер Х. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы работы и возможности вибрационных датчиков. 2004. №12.

ваниям к установке и т.п. В практике промышленных измерений не существует "плохих" и "хороших" датчиков, логичнее говорить о правильном либо ошибочном выборе прибора и его установке. Поэтому далее рассмотрим несколько основополагающих факторов, подлежащих учету при инженерной проработке измерительной точки и спецификации уровнемера.

Физические основы измерений

Принцип работыToF-уровнемеров основан на излучении зондирующего сигнала, его отражении от поверхности среды и приеме отраженного сигнала. Время, прошедшее от момента излучения до момента прихода отраженного сигнала, при известной скорости распространения легко пересчитывается в удвоенную дистанцию от излучателя (антенны, мембраны) до поверхности продукта. В общем случае, дистанция до поверхности продукта и измеряемый уровень — это разные вещи, однако при фиксированном положении уровнемера относительно емкости (танка, силоса, резервуара и т.п.) эти две величины легко взаимнообразно преобразуются. Более того, в современных ToF-приборах М-класса имеется возможность непосредственного измерения объема продукта. Для случая емкости сложной формы либо при значительной "неидеальности" формы параллельной емкости предусмотрена дополнительная функция аппроксимации зависимости "уровень/объем" по 32-м эмпирическим точкам.

Для понимания различных факторов, влияющих на измерения, прежде всего, важна физическая суть зондирующего сигнала. Ультразвуковой уровнемер использует звуковую волну в диапазоне частот 40...70 кГц. Частота сигнала в общем случае зависит от мощности излучателя, так как более мощный датчик имеет мембрану большего геометрического размера, которая возбуждается на более низкой частоте. Таким образом, чем больше требуемый диапазон измерения уровня, тем ниже рабочая частота датчика. Микроимпульсный направляемый радар Levelflex М использует в своей работе очень короткие зондирующие радиоимпульсы, поэтому в частотной области его сигнал имеет достаточно широкий спектр. Эффективная ширина спектра флекс-радаров лежит в пределах 200 МГц...1,5 ГГц. Микроволновые бесконтактные радары Micropilot М используют узкополосные сигналы с кодовым разделением в диапазонах частот 6 и 26 ГГц.

Исходя из принципа действия ToF-приборов, можно выделить два основополагающих момента, которые необходимо учитывать при измерении уровня. Первый — это условия по трассе распространения сигнала, иными словами среда, в которой зондирующему сигналу предстоит "лететь" до поверхности продукта и обратно. Второй — это условия отражения от поверхности продукта. Рассмотрим оба влияющих фактора более подробно.

Условия распространения сигнала

Трасса распространения сигнала должна отвечать двум основным условиям. Во-первых, сигнал не дол-

жен сильно поглощаться средой или, как говорят, "затухать". Сильное ослабление сигнала по трассе снижает диапазон измерений и требует увеличения мощности излучения, которая для двухпроводных приборов является критическим фактором. Во-вторых, скорость распространения сигнала по трассе должна быть известна с достаточной точностью (постоянна или детерминирована), в противном случае возникает дополнительная погрешность измерения дистанции и соответственно уровня.

Если говорить о затухании, то для электромагнитных волн этот фактор не является значимым практически в любом газовом слое. Для ультразвука же существует ряд факторов, которые вызывают существенное снижение мощности излучения. Например, плотное облако пыли в силосе может вызвать дополнительное затухание до 20дБ, а разность температур сенсора и поверхности продукта в 20°C даст нам еще 5...10 дБ потерь. Такие факторы обычно перечислены в техническом описании прибора и их учет при выборе датчика в общем случае не так сложен. Более неоднозначен вопрос со скоростью распространения сигнала, поэтому остановимся на нем подробнее.

Скорость распространения ультразвука зависит как от состава газового слоя, так и от его температуры. Если говорить о зависимости скорости от состава газа, то в воздухе при 0°C звук распространяется со скоростью 331 м/с, в углекислом газе — 258 м/с, в гелии — 965 м/с, а в водороде — 1284 м/с. Известная формула Лапласа для идеального газа выглядит так:

$$C = \sqrt{\frac{x \cdot R_m \cdot (273 + T)}{M}},$$

где x — адиабатический коэффициент, R_m — универсальная газовая постоянная, T — температура газа, M — молекулярный вес газа.

Как видно из вышеприведенных примеров, в зависимости от газового слоя разница в скорости звука может составлять десятки и даже сотни процентов. Температурную же зависимость можно характеризовать коэффициентом примерно 0,17 %/К. Это значит, что при изменении температуры среды на 10К возникает дополнительная погрешность порядка 1,7%. Поскольку температурная зависимость детерминирована, ее легко учесть и устранить. Так обычно и делается в реальных приборах, то есть непосредственно в излучателе устанавливается датчик температуры. Проблема заключается в том, что температура сенсора, установленного под крышкой сосуда или силоса, не всегда соответствует средней температуре по трассе распространения. Таким образом, с ультразвуком следует быть очень осторожным при наличии паров продукта (давление паров >50 мбар) и при резких колебаниях температуры, например, в силосах на открытом воздухе, подвергающихся суточным и сезонным колебаниям, нагреву солнечными лучами и т.п.

Для электромагнитных волн скорость их распространения описывается выражением:

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_{rel} \cdot \mu_{rel}}},$$

где C_0 — скорость света в вакууме, ε_{rel} — относительная диэлектрическая проницаемость, μ_{rel} — относительная магнитная проницаемость. Значения относительной диэлектрической и магнитной проницаемости для различных газов приведены в таблице.

Таблица

Газ	ε_{rel}	μ_{rel}
воздух	1,000594	1,000000
CO	1,000985	1,000000
O ₂	1,000486	1,000002
N ₂	1,000528	1,000528
SO ₂	1,0099	0,999991

Нетрудно подсчитать, что различие в скорости распространения электромагнитной волны в отличных от воздуха газах составляет в худшем случае сотые доли процента, то есть несоизмеримо малую величину в сравнении с погрешностью промышленных уровнемеров. Другими словами, радар практически инвариантен к газовому слою по трассе распространения.

Таким образом, при большом содержании паров продукта в емкости, а также в случае резких колебаний температуры в общем случае следует отдавать предпочтение радару перед ультразвуковым уровнемером.

Условия отражения сигнала

Хорошее отражение сигнала от поверхности продукта является вторым необходимым условием успешных измерений уровня с помощью ToF-прибора. Чем больше амплитуда отраженного сигнала, тем выше отношение сигнал/шум и, следовательно, выше точность измерения и больше рабочий диапазон. Однако на отражение электромагнитных волн и ультразвука влияют совершенно разные факторы.

Ультразвук является по своей сути механической волной, и условием ее хорошего отражения является градиент плотности. Другими словами, чем "тверже" продукт по сравнению с воздухом, тем выше в общем случае амплитуда отраженного сигнала. Для электромагнитной волны, напротив, плотность практически не играет значения. Условием ее хорошего отражения является градиент диэлектрической проницаемости. Например, рабочий диапазон радара на воде с $\varepsilon=80$ будет значительно больше, чем на керосине с $\varepsilon=2,1$.

Кроме физических свойств продукта (плотности и диэлектрической константы) на отражение сигнала также влияет и поверхность рабочей среды. Если говорить о жидкостях, то основными проблемами являются волны, вызываемые, например, мешалкой или заливной струей, а также пена. Волнение на поверхности среды приводит к дополнительному рассеянию сигнала в стороны от направления зондирования. С пеной в общем случае не все однозначно. Под так называемой "легкой" пеной как ультразвуковой уровнемер, так и радар может детектировать уровень рабочей среды. В случае с "тяжелой", плот-

ной пеной сам продукт недоступен, но возможно изменение уровня пены. Самым критичным является некий промежуточный случай, когда пена недостаточно "легкая" для прохождения сигнала и недостаточна плотная для отражения от нее. В этом случае бесконтактное измерение практически невозможно. Однако, если условия процесса допускают контакт со средой, то оптимальным решением является применение направляемого радара Levelflex M. За счет высокой концентрации энергии вдоль троса или штыря этот прибор способен "пробивать" практически любой слой пены.

Самостоятельной задачей является измерение так называемого интерфейса или уровня раздела фаз в жидких средах. Такие измерения востребованы, например, в нефтедобыче и нефтехимии для измерения уровня подтоварной воды, в пищевой промышленности для измерения уровня жирового слоя и т.п. Общего решения такой измерительной задачи на сегодняшний день не существует. Известно несколько технических решений различных производителей, которые в конкретных условиях позволяют выполнять измерения интерфейса. Это, например, сервоуровнемеры, емкостные уровнемеры, поплавковые ультразвуковые уровнемеры, направляемые радары и ряд других. Не будем останавливаться на особенностях их работы, заметим лишь, что все эти измерения контактные.

Если говорить об отражении от сыпучих материалов, то основной проблемой является наличие насыпного конуса, то есть поверхность продукта никогда не перпендикулярна направлению распространения луча. Для надежного бесконтактного измерения с помощью ультразвука требуется выполнение условия диффузного (рассеянного) отражения. Это условие состоит в том, что размер частиц должен быть более четверти длины волны, которая зависит от мощности сенсора. Не вдаваясь в подробности, можно считать, что при размере частиц от 10 мм всегда существует надежное диффузное отражение. В случае же слишком мелкой фракции энергия сигнала уходит в сторону от направления зондирования за счет зеркального отражения от поверхности конуса. Тогда предпочтительно использовать тросовый радар Levelflex M или специальную модель бесконтактного радара Micropilot M для сыпучих материалов, которая совсем недавно появилась в продуктовой линейке Endress+Hauser.

Micropilot M или Levelflex M?

Бесконтактные Micropilot M и контактные Levelflex M радарные уровнемеры имеют несколько моделей и вариантов конструктивного исполнения. Класс Micropilot M, например, включает модели со штыревой (FMR231), рупорной (FMR230, FMR240) и волноводной (FMR240) антенной, а также специальные модели для работы на агрессивных средах (FMR244, FMR245) и на сыпучих материалах (FMR250). Levelflex M допускает варианты исполнения с тросовой, штыревой и коаксиальной антенной (FMP40), существуют специальные модели для высокой температуры (FMP45) и агрессивных сред (FMP41C). Отметим, что Micropilot M

FMR240 с волноводной антенной также является контактным уровнемером, по характеристикам и применению очень схожим с коаксиальным Levelflex M FMP40. Итак, когда предпочтительно использовать бесконтактное или контактное измерение?

Контакт со средой имеет как несомненные преимущества, так и недостатки. Основное достоинство — это возможность достижения высокой концентрации электромагнитной энергии вдоль погружного конструктивного элемента (троса, штыря, волновода, коаксиального волновода). За счет концентрации энергии можно существенно повысить диапазон измерения уровня, снизить требования к минимальному значению диэлектрической константы, преодолевать влияние пены и волнения на поверхности среды. Контактный уровнемер практически нечувствителен к различным препятствиям внутри емкости. Измерение уровня рабочих сред с экстремально низким значением диэлектрической константы, например, сжиженных газов ($\epsilon=1,4...1,6$) или поливинилхлоридного порошка или гранулята ($\epsilon=1,6$), на сегодняшний день возможно только контактным способом. Что касается рабочего диапазона, то для тросовой версии уровнемера Levelflex M он может достигать 35 м.

Основные недостатки контактного измерения — это механическое (абразивное и разрывное) воздействие на зонд, коррозионное воздействие при работе на агрессивных средах, образование отложений на зонде (особенно нерегулярных), генерирующих паразитные отражения, а также различные проблемы, связанные с инсталляцией. Например, зачастую требуется закрепить конец троса на днище емкости, что в свою очередь требует ее опорожнения. При наличии в емкости мешалки следует принять меры, чтобы тросовую пробу не наматало на нее и т.д. Что касается агрессивных сред, то рупор бесконтактного радара намного проще защитить от среды тефлоновым колпачком (Micropilot M FMR244) или диском (FMR245), чем, например, трос (Levelflex M FMP41C), любое повреждение покрытия на котором влечет выход изделия из строя. Если имеем довольно "грубый" сыпучий материал, например, каменный уголь или щебень, то контактное измерение противопоказано по механическим соображениям. Также многие продукты вызывают нарастание "бляшек" на тросе или штыре уровнемера, сигнал от которых затем может создавать помехи и даже детектироваться как ложный уровень.

Существует одно интересное применение тросового радара Levelflex M при измерениях в неметаллических емкостях с агрессивными средами. Измерение уровня в таких случаях возможно извне без контакта со средой, для чего трос монтируется вдоль стенки сосуда с наружной стороны. Прибор способен "видеть" уровень продукта через неметаллическую стенку емкости.

Низкочастотный или высокочастотный Micropilot M?

Компания Endress+Hauser поддерживает двухчастотную продуктовую линейку радаров Micropilot M

для жидких сред. Ряд моделей (FMR230, FMR231) работают на частоте порядка 6 ГГц, другие модели (FMR240, FMR244, FMR245) — на частоте 26 ГГц. Такая концепция проводится в жизнь совершенно сознательно, потому что рабочая длина волны прибора влияет на ряд характеристик излучения и отражения. На практике для одних применений оказывается более применим низкочастотный, а для других — высокочастотный радар.

Высокочастотный радар за счет малой длины волны имеет два основных преимущества. Первое — это более высокая разрешающая способность и, как следствие, более высокая точность измерений. В нормальных условиях погрешность измерений составляет ~3 мм. Второе — это компактная конструкция, достигаемая за счет небольших размеров рупора, что позволяет выпускать прибор даже с резьбовым (1½") присоединением к процессу, а также более узкий луч (до 8° по уровню половинной мощности).

Радары диапазона 6 ГГц имеют большие геометрические размеры рупора, более широкий луч, монтируются всегда на фланце и обеспечивают точность измерений на уровне 10 мм. Зачем производить такую модель, состоящую из одних недостатков? На это есть две основные причины. Первая причина состоит в конденсате, который образуется на поверхности рупора. Это явление не такое уж и редкое, учитывая, что прибор всегда монтируется под крышкой емкости. Каждая капля конденсата выполняет роль рассеивающей линзы для электромагнитной волны, и этот эффект для низкочастотного радара сказывается значительно слабее за счет более чем в 4 раза большей длины волны. Вторая причина использования более низкой рабочей частоты связана с поверхностью среды. Опять же за счет большей длины волны низкочастотный радар оказывается менее чувствительным к турбулентной поверхности и к пене. Еще можно выделить ряд частных случаев, связанных с физическими свойствами некоторых сред. Например, у аммиака поглощение сигнала возрастает с увеличением частоты так, что на частоте 26 ГГц измерения проводить практически невозможно. Поэтому единственное на сегодняшний день решение для аммиака — это измерение низкочастотным радаром в обсадной (измерительной) трубе.

Программный пакет ToFTool

С каждым ToF-прибором M-класса покупателю бесплатно поставляется пакет ПО ToFTool+FieldTool, (ПО FieldTool предназначено для работы с расходомерами сер. PROline²).

Чтобы использовать возможности программы ToFTool, необходимо подключить ToF-прибор к ПК через сервисный порт с помощью коммуникатора FXA193 либо через HART-протокол с помощью коммуникатора FXA191. Каковы же возможности этой программы? Во-первых, пользователь получает полный доступ ко всей матрице программирования прибо-

² Крошкин А.Н. Семейство расходомеров PROline компании Endress+Hauser. 2004. №10.

ра, включая и сервисные параметры (защищены паролем от несанкционированного доступа). Дружественный интерфейс программы позволит быстро и наглядно выполнить базовые настройки прибора (рис. 5). В 90% случаев для надежной работы уровнемера достаточно базовых настроек. В более сложных случаях, например, когда имеются препятствия по трассе распространения сигнала, может потребоваться более "тонкая" настройка прибора, в частности, наложение пользовательской "маски". На экране ПК будет отображена огибающая кривая реального отраженного сигнала, статическая и динамическая "маски" и другие вспомогательные кривые. Такая наглядность в ряде случаев значительно облегчает настройку уровнемера под конкретные условия его инсталляции. С помощью ПО ToFTool возможно внести в память прибора градуировочную таблицу емкости для получения непосредственного измерения объема. А самое большое преимущество использования данного ПО — это то, что для настройки прибора не надо залезать на высокий резервуар, стоящий к тому же на морозе или во взрывоопас-

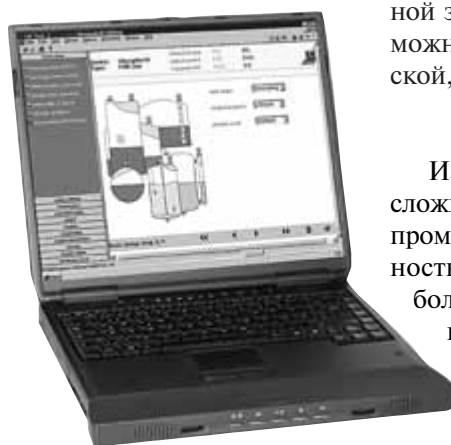


Рис. 5. Программный пакет ToFTool

ной зоне. Все необходимые манипуляции можно произвести прямо из операторской, используя HART-протокол.

Заключение

Измерение уровня — одна из самых сложных измерительных задач на рынке промышленной автоматизации. Ее сложность обусловлена, в первую очередь, большим объемом исходных данных, необходимых для принятия правильных инженерных решений. Сюда входят и характеристики среды, и конфигурация емкости, и габариты установочного патрубка, и наличие дополнительных внутренних конструкций, байпасов, измерительных колодцев, а также множество других параметров. Другая сложность состоит в том, что многие из этих параметров не поддаются четкой формализации. Это затрудняет, например, составление, заполнение и интерпретацию опросных листов. Мы надеемся, что даже самые общие рассуждения, приведенные в данной статье, позволят специалистам эффективнее решать практические инженерные задачи, в том числе и с применением самых современных средств измерений компании Endress+Hauser.

Крошкин Алексей Николаевич — канд. техн. наук, ведущий специалист ООО "Эндресс+Хаузер".

Контактный телефон (095) 783-28-50.

RX3i — НОВЫЙ ПРОДУКТ СЕМЕЙСТВА PACSYSTEMS™ GE FANUC

Н.А. Захаров (Компания "Адвантек Инжиниринг")

Рассмотрен новый продукт RX3i семейства PACSystems™ фирмы GE Fanuc (США). Показано отличие PAC (Programmable Automation Controller) от предшествующих им ПЛК.

Фирма GE Fanuc (США) приступила к выпуску новой линейки семейства PACSystems™ [1] — RX3i. В основе архитектуры RX3i лежит высокопроизводительная шина PCI. Модуль центрального процессора на базе Pentium® III имеет движок PACSystems™, унифицированный с RX7i. Этот движок реализован на основе стандартных встраиваемых архитектур и использует апробированные промышленные ОС. Это делает его переносимым на многие платформы, что позволяет пользователю выбирать технические средства и языки программирования, наилучшим образом подходящие для его приложения. В качестве инструментального средства для разработки прикладных программ, исполняемых на различных платформах, используется ПО Proficy Machine Edition, ранее выпускавшееся под названием Simplicity Machine Edition (ME) [2].

Модуль центрального процессора RX3i построен на основе микропроцессора Pentium III с тактовой частотой 300 МГц. Для программы и данных пользователя он предоставляет 10 Мбайт оперативной памяти с резервным питанием и 10 Мбайт флэш-памяти. Большой объем памяти контроллера позволил организовать хране-

ние в контроллере документации на прикладное ПО, что существенно облегчает техническую поддержку и сопровождение системы управления. Системное ПО также хранится во флэш-памяти и, при необходимости, его можно обновить через последовательный порт.

Центральный процессор имеет в своем составе два последовательных порта RS-232 (порт 1) и RS-485 (порт 2). Порты поддерживают протокол RTU слэив, они могут быть использованы для обновления системного ПО.

Основным средством коммуникаций для контроллера RX3i является модуль Ethernet. В отличие от RX7i, ЦПУ RX3i не содержит встроенных портов Ethernet. Модуль Ethernet RX3i имеет два порта Ethernet, подключенных к встроенному коммутатору. IP-адрес у модуля один. Порты автоматически определяют скорость (10 или 100 Мбит/с), дуплекс или полудуплекс, тип кабеля (прямой или перекрестный). Наличие двух портов и встроенного коммутатора делает возможным соединение устройств PACSystems в сеть Ethernet шлейфом. Для обмена данными с другими ПЛК GE Fanuc, в том числе VersaMax® и Series 90™, поддерживается механизм глобальных данных Ethernet Global Data.