

Радарные уровнемеры: история создания и перспективы развития систем контроля уровня



Автор статьи раскрывает не только особенности применения радарных уровнемеров, использующих микроволновый бесконтактный метод измерения, но и предпосылки их появления, перспективы развития и основные тенденции на рынке уровнемеров в наши дни.

ЗАО «Лимако», г. Тула

На сегодняшний день в промышленных системах реализовано лишь небольшое число методов контроля уровня, позволяющих получать достоверную и точную информацию. Некоторые из них по-настоящему уникальны и случаи их применения довольно редкие, другие – универсальны и широко используются в серийных системах. Но существует ли единый метод, сочетающий в себе универсальность и качество? Преимущества радарного метода измерения настолько очевидны, что можно уверенно прогнозировать широкое распространение радарных уровнемеров в самом ближайшем будущем. Данный метод уже доказал свою состоятельность для широкого спектра отраслей промышленности – химия и нефтехимия, фармацевтика и пищевая промышленность. Ни температура, ни давление рабочей среды практически не влияют на микроволны, причем и температура, и давление могут иметь значения, недопустимые для применения других методов, в первую очередь контактных. Опыт, полученный специалистами в использовании принципа, основанного на измерении времени прохождения микроволновых импульсов, привел к созданию целого семейства радарных уровнемеров.

История появления радарных уровнемеров

Специалисты задумывались о возможности использования ра-

диоволн для обнаружения удаленных объектов уже давно: в 1886 году немецкий ученый-физик Генрих Герц обнаружил, что радиоволны способны отражаться металлическими и диэлектрическими телами, а в 1897 году российский ученый Попов открыл, что радиоволны отражаются от металлических частей кораблей и их корпуса. Изобретатель радара Кристиан Хюльсмайер (Christian Huelsmeyer) родился в 1881 году в городке Эйделштетт в Нижней Саксонии. Еще будучи школьником, он экспериментировал с аппаратом Герца и заметил, что металлические зеркала отражают электрические волны. Таким образом, был сделан вывод, что посредством этих волн можно будет обнаружить в тумане корабли и другие металлические объекты. В 1904 году он получил патент на устройство, в котором эффект отражения радиоволн использовался для обнаружения кораблей. Из-за несовершенства конструкции разработки Хюльсмайера практического применения не получили. Понадобилось не менее тридцати лет, прежде чем идея применения радиоволн смогла быть использована для создания реальной аппаратуры.

Насущная необходимость в радарных уровнемерах появилась в 70-80-х годах прошлого века, когда контактные методы измерения уровня (поплавковые, буйковые и т.д.) достигли своего предела по надежности, затратам на обслуживание, точности и поэтому начали

сдерживать темпы автоматизации управления резервуарными парками. Считается, что в 1976 году фирма SAAB первой в мире применила радарную технологию для контроля уровня сырой нефти, перевозимой супертанкерами. До этого момента для подобной цели использовались измерительные системы, основной недостаток которых заключался в большой зависимости точности измерения от таких физических параметров контролируемой среды, как температура, давление и плотность. Уровнемеры, основанные на радарном методе измерения, практически не имели всех этих недостатков. Именно это обстоятельство и обеспечило их широкое применение в самых различных отраслях промышленности.

Прототипом радарного уровнемера явились радиовысотомеры (радиодальномеры), которые широко применялись в военной, главным образом авиационной, промышленности. В этих приборах для оценки расстояний использовалось измерение запаздывания принятого радиосигнала относительно излученного. Однако оперировать уже отработанными в военной промышленности техническими решениями для создания радарных уровнемеров долгое время не удавалось из-за низкой надежности вакуумных генерирующих СВЧ-устройств и их высокой стоимости. Дело в том, что для радиовысотомеров, использовавшихся в военной промышленности,

не требовался длительный ресурс непрерывной работы, в то время как для радарных уровнемеров этот ресурс должен был измеряться годами. Прорыв на данном направлении произошел после того, как на рынке появились коммерчески доступные, надежные полупроводниковые СВЧ-генераторы, а также высокоточные синтезаторы частоты и сигнальные процессоры, которые позволили сравнительно простыми средствами реализовать обработку сигнала, гарантирующую требуемую высокую точность измерения.

Принцип действия радарных уровнемеров. Их разновидности

Принцип действия всех известных радарных уровнемеров основан на измерении времени распространения радиоволны от антенны уровнемера до поверхности продукта, уровень которого измеряется, и обратно.

Наиболее простым с точки зрения реализации на первый взгляд выглядит импульсный метод, заключающийся в измерении времени запаздывания принятого импульса относительно излученного. Однако при ближайшем рассмотрении очевидны технические трудности реализации этого метода.

Во-первых, излучаемый импульс должен быть достаточно коротким, чтобы закончиться раньше, чем в антенну поступит отраженный импульс, т.е. иметь длительность в единицы наносекунд и менее, что реализовать не так просто. Во-вторых, излучаемый радиоимпульс должен иметь достаточно большую мощность, чтобы обеспечить требуемое соотношение сигнал-шум в принятом сигнале, а это накладывает серьезные требования к излучающему элементу, особенно при больших диапазонах измерения уровня и низких отражательных способностях продукта. В-третьих, задача высокоточного измерения наносекундных временных интервалов между излученным и принятым импульсом технически непростая в решении.

В силу перечисленных факторов, импульсные методы не нашли широкого распространения при решении задач по высокоточному измерению уровня и применяются лишь там, где

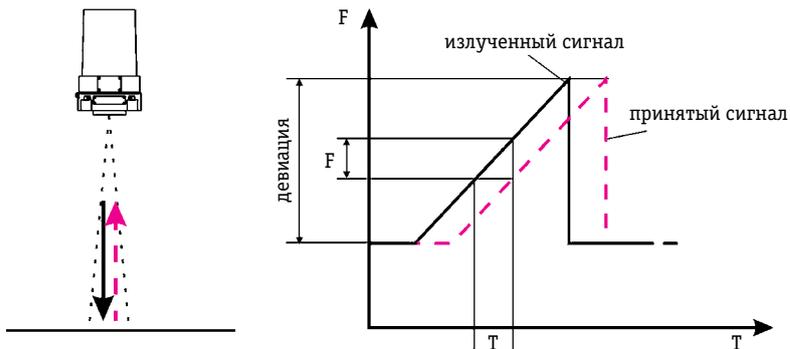


Рис. 1. Принцип действия радарного уровнемера

отражательная способность продукта сравнительно высока и не требуется высокая точность.

Более широкое распространение для высокоточных измерений получили радарные уровнемеры, использующие непрерывное модулированное по частоте радиоизлучение (FMCW). Принцип действия такого уровнемера заключается в следующем. Микроволновый генератор датчика уровня формирует радиосигнал, частота которого изменяется во времени по линейному закону — линейный частотно-модулированный сигнал. Этот сигнал излучается в направлении продукта, отражается от него, и часть сигнала через определенное время, зависящее от скорости света и расстояния, возвращается обратно в антенну. Излученный и отраженный сигналы смешиваются в датчике уровня, и в результате образуется сигнал, частота которого равна разности частот принятого и излученного сигналов F и соответственно расстоянию от антенны до измеряемого продукта. Дальнейшая обработка сигнала осуществляется микропроцессорной системой датчика уровня и заключается в точном определении частоты результирующего сигнала и пересчете ее значения в значение уровня наполнения резервуара.

При выборе конкретной модели радарного уровнемера потребителю немаловажно понять, от чего конкретно зависят потребительские свойства радарного уровнемера.

Наиболее важными являются следующие параметры радарного уровнемера:

- ▶ точность;
- ▶ чувствительность;
- ▶ быстродействие;
- ▶ простота монтажа;

▶ цена.

Как показано выше, все радарные уровнемеры состоят из следующих основных узлов:

- ▶ антенна;
- ▶ приемопередающий (СВЧ) блок;
- ▶ сигнальный процессор;
- ▶ контроллер коммуникации.

Давайте рассмотрим подробно функции и параметры каждого из них.

Антенна

Задачей антенны является формирование радиолуча. Радиолуч, если он распространяется в открытом, не ограничивающем его пространстве, представляет собой конус, вершина которого совпадает с основанием антенны. Ширина этого конуса (угол раскрытия) обратно пропорциональна апертуре (диаметру) антенны и обратно пропорциональна частоте излучения (это, как правило, является фундаментальным и не зависит от типа антенны). Другими словами, требуемую ширину луча, гарантирующую свободное, не задевающее стенки резервуара распространение радиолуча, можно обеспечить или увеличением частоты излучения, или увеличением габаритов антенны. А при одной и той же ширине луча габариты антенны более высокочастотного радарного уровнемера будут во столько раз меньше, во сколько раз его частота выше, чем у радарного уровнемера с меньшей частотой излучения. Этот факт хорошо иллюстрируется рисунком 2, где в масштабе показаны уровнемер УЛМ-11, работающий на частоте более 90 ГГц и имеющий ширину луча 4° , антенна которого из-за малых габаритов не выходит за контуры корпуса, и гипотетический

радарный уровнемер с такой же шириной луча, но работающий на частоте 10 ГГц.

Влияют ли параметры антенны на точность измерения? Да, влияют. Дело в том, что для обеспечения высокой точности измерения необходимо высокое отношение сигнал/шум на входе уровнемера (как правило, не менее 20 дБ), а это отношение при одной и той же мощности излучения и коэффициенте шума приемника тем больше, чем уже радиолуч. Уменьшение же ширины луча, как было показано выше, может быть достигнуто или за счет увеличения габаритов антенны, или за счет повышения частоты излучения.

Следует отметить еще один важный фактор влияния вида и размеров антенны на точность измерения, который не всегда учитывают при выборе уровнемера. Это влияние выпадения конденсата на поверхность антенны. Как бы некоторые производители радарных уровнемеров не заверяли покупателей в том, что выпадение конденсата не влияет на точность их уровнемера, — это не так. Скорость распространения радиоволны через конденсат резко отличается от скорости распространения в открытом пространстве. Поэтому выпадение конденсата всегда ведет к дополнительной погрешности, величина которой может достигать нескольких миллиметров. Поэтому при выборе радарных уровнемеров, когда требуется высокая точность измерений, надо в первую очередь обратить внимание на уровнемеры, у которых возможность выпадения конденсата на антенне меньше.

Из физики известно, что выпадению конденсата подвержены

поверхности, температура которых ниже, чем температура среды. Поэтому, если температура антенны радарного уровнемера, установленного на крыше резервуара, будет ниже, чем температура паров продукта, то конденсат неизбежно выпадет на поверхность антенны и приведет к дополнительной погрешности. Избежать этого частично или полностью можно, обогревая антенну. Однако, если антенна имеет большие размеры, реализовать это с учетом требований взрывозащиты практически невозможно.

Радарные уровнемеры, работающие на высоких частотах излучения, позволяют из-за малых габаритов антенны расположить последнюю непосредственно в корпусе уровнемера и для подогрева антенны использовать тепло, выделяемое аппаратурой уровнемера, а также дополнительные нагревательные элементы, расположенные внутри взрывозащищенного корпуса. Именно так устроен уровнемер УЛМ-11. Поверхность его антенны всегда теплее паров, и поэтому выпадение конденсата минимально.

Эксплуатация радарных уровнемеров для измерения уровня мазута в резервуарах с подогревом на различных ТЭЦ и ГРЭС полностью подтвердило это преимущество высокочастотных радарных уровнемеров.

Если сравнивать вклад стоимости изготовления антенны в стоимость радарного уровнемера в целом для уровнемеров, работающих на разных частотах, то здесь необходимо отметить следующее. Для антенн рупорных, рупорно-линзовых и зеркальных, — стоимость с повышением частоты падает из-за уменьшения габаритов и соответственно материалоемкости.

Однако резкое снижение стоимости изготовления антенны может быть достигнуто при ее микрополосковом исполнении. В этом случае антенна представляет собой практически печатную плату. Но реализовать такую антенну на частоте выше 20 ГГц крайне затруднительно. Поэтому низкочастотные уровнемеры в этой части имеют преимущество, которое для случаев, когда не требуется высокая точность и не требуется узкий луч и высокая чувствительность, заключается в дешевизне такого уровнемера. На рис. 3 показан уровнемер УЛМ4-5 с микрополосковой антенной, работающий в см-диапазоне.

Приемопередающий (СВЧ) блок

Важнейшим узлом радарного уровнемера является приемопередающий (СВЧ) блок. Без преувеличения его можно назвать сердцем уровнемера. Именно этот узел определяет весь комплекс характеристик радарного уровнемера от точности до стоимости.

Рассмотрим, как влияют на точность измерения отдельные параметры СВЧ-блока. Как было показано выше, на точность измерения влияет отношение сигнал/шум на входе уровнемера. На это отношение влияют мощность излучения и чувствительность (коэффициент шума) приемника. Очевидно, что повышать мощность излучения беспредельно нельзя из соображений техники безопасности, взрывобезопасности и надежности. Как правило, излучаемая мощность радарных уровнемеров не превышает десятых долей милливатт. Чувствительность приемника (коэффициент шума) определяется, как правило, шумовыми параметрами входных элементов и лежит в пределах 8 — 12 дБ. Следующим важнейшим параметром приемопередающего блока является девиация частоты излучения (см. рис. 1) или, другими словами, диапазон изменения частоты излучения в процессе измерения. Из теории измерения расстояния FMCW методом известно, что чем выше девиация частоты, тем выше разрешающая способность и точность измерения расстояния (в нашем случае уровня). Однако стремление увеличить

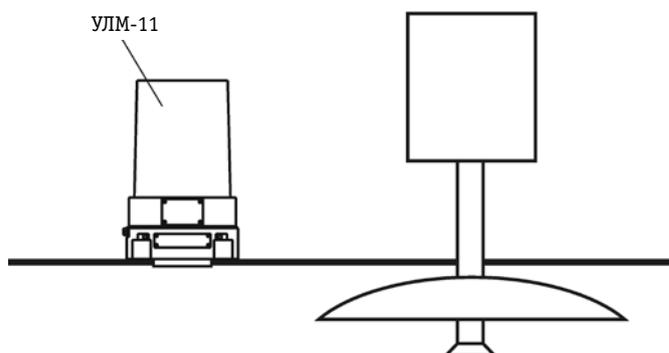


Рис. 2. Сравнение габаритных размеров

девиацию частоты наталкивается на техническую сложность обеспечения широкополосности приемопередающего блока. Причем эта сложность тем больше, чем больше отношение девиации к несущей частоте. Например, если для обеспечения требуемой точности измерения нужна девиация 2 ГГц, то обеспечить ее при несущей частоте 10 ГГц, где отношение девиации к несущей частоте составляет 0,2, значительно сложнее, чем при несущей частоте 100 ГГц, где это отношение составляет 0,02. Это подтверждается тем, что в уровнемерах УЛМ-11, работающих на несущей частоте более 90 ГГц, достигнута девиация частоты 4 ГГц, в то время как в приборах, работающих на частотах 6–24 ГГц, она, как правило, не превышает 1 ГГц. Для достижения высокой точности измерения необходимо также обеспечить очень высокую линейность изменения частоты излучения в процессе измерения. Еще 10 лет назад это составляло серьезную проблему и требовало сложных и дорогостоящих технических средств (например, высокоточного термостатирования СВЧ-блока.) В последние годы в связи с появлением высокоточных синтезаторов частоты, управляемых процессором, решение этой проблемы не представляет большой сложности.

Из всего сказанного следует, что чем выше частота, на которой работает приемопередающий блок, тем выше потенциальные возможности уровнемера по точности и чувствительности. Однако приемопередающий блок является сложнейшим радиоэлектронным устройством как с точки зрения изготовления, так и с точки зрения проектирования. Причем сложность разработки и производства таких блоков существенно возрастает с ростом частоты. Приемопередающие блоки, работающие на частотах 6–24 ГГц, выполняются, как правило, по микрорешетчатой технологии, причем чем выше частота, тем выше требования к технологии в связи с меньшими размерами микрорешетчатых элементов. Приемопередающие же блоки, работающие на частотах выше 30 ГГц, могут быть выполнены по комбинированной микро-



Рис. 3. Внешний вид датчика уровня УЛМ4-5

лосково-волноводной технологии, что существенно сложнее и дороже микрорешетчатой технологии. Так же следует отметить, что с ростом частоты существенно растут затраты на измерительное оборудование, используемое при производстве, настройке и испытаниях. Таким образом, за более высокие технические характеристики высокочастотных приемопередающих блоков приходится платить удорожанием этих блоков и, как следствие, удорожанием уровнемеров в целом.

Кроме того, специфика проектирования и освоения производства приемопередающих блоков, заключающаяся в приближенности существующих методик расчета и большого числа итераций при разработке, приводит к значительным срокам от момента постановки задачи до момента начала серийного производства. Эти проблемы усугубляются с ростом частоты.

Резюмируя сказанное выше, можно сделать вывод, что, во-первых, приемопередающий блок — это наиболее сложная и дорогостоящая часть радарного уровнемера, а во-вторых, освоение производства радарных уровнемеров требует значительных сроков и капитальных вложений. Поэтому число производителей радарных уровнемеров, присутствующих на мировом рынке, сравнительно невелико.

Сигнал с выхода СВЧ-блока должен пройти дальнейшую обработку для получения окончательных данных об уровне наполнения резервуара.

Сигнальный процессор

На вход сигнального процессора с выхода СВЧ-блока поступает сигнал, в котором содержится полезная составляющая, сформированная от-

ражением от поверхности продукта, помехи, шум. Задачей сигнального процессора является за конечное время (десятки миллисекунд) выделить из сигнала полезную составляющую и с требуемой точностью измерить частоту этого сигнала, которая, как было показано выше, прямо пропорциональна расстоянию от антенны до поверхности продукта. Наиболее подходящим алгоритмом для решения этой задачи является дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Алгоритм ДПФ требует высокой разрядности, высокого быстродействия и значительного объема памяти. В 90-х годах прошлого века существовавшие сигнальные процессоры в силу относительно невысоких параметров не позволяли оптимально решить проблему измерения. В настоящее время ситуация кардинально изменилась. Успехи таких производителей, как Analog Devices, Texas Instruments и др., выпустивших на рынок высокопроизводительные сигнальные процессоры, привели к тому, что оптимальная обработка сигнала теперь требует сравнительно небольших усилий, а доля стоимости аппаратуры обработки сигнала в стоимости уровнемера упала до 5–8 %.

Вследствие этого различия в эффективности обработки сигнала у различных производителей радарных уровнемеров свелись к минимуму. В связи с этим роль высокочастотной части уровнемера (антенна и приемопередатчик) еще больше возрастает, так как становится более важным не то, как ты обрабатываешь сигнал, а то, какой сигнал ты обрабатываешь.

Контроллер коммуникации

Контроллер коммуникации является узлом, обеспечивающим связь радарного уровнемера с внешними объектами. Сегодня производители радарных уровнемеров представляют потребителям широкую номенклатуру цифровых и аналоговых интерфейсов. Реализуются они с помощью стандартных аппаратных и программных средств. Доля стоимости аппаратуры, обеспечивающей коммуникацию радарного уровнемера, как правило, не превышает единиц процентов от общей стоимости.

Как правильно выбрать радарный уровнемер

В настоящее время на рынке присутствует значительное количество моделей радарных уровнемеров с диапазоном измерения до 30 м, паспортной точностью от $\pm 0,5$ до ± 10 мм и ценой от 0,8 до 10 тысяч долларов. Задача потребителя – подобрать модель, удовлетворяющую поставленным требованиям, не переплатив. Первое, что необходимо сделать, – это тщательно изучить рекламируемые технические характеристики. Дело в том, что методики нормирования метрологических характеристик у разных производителей несколько отличаются. Например, некоторые производители вместо точности указывают параметр «разрешающая способность», а это далеко не одно и то же. Иногда в основных технических характеристиках указана очень высокая точность измерения, а при более тщательном рассмотрении выясняется, что это относится к нормальным условиям эксплуатации, а при изменении температуры нормируется дополнительная погрешность, и т.п. Главное, как было показано выше, потребитель должен понять, что вся потенциальная точность и чувствительность заложены в высокочастотной части уровнемера, а именно – в антенне и СВЧ-блоке. Грамотная обработка сигнала, а в большинстве выпускаемых уровнемеров она, естественно, выполнена грамотно, позволяет извлечь максимум информации с выхода СВЧ-блока, добавить же информации она принципиально не может. Информации на выходе СВЧ-блока, как было показано выше, тем больше, чем выше используемая частота. Поэтому потребитель должен обращать внимание на то, на какой частоте работает уровнемер, и что бы ни было записано в рекламе относительно точности, должен понимать, что чем выше частота, тем точность более обоснованна и гарантирована. Естественно, при этом необходимо учитывать, что

высокочастотные радарные уровнемеры потенциально более дорогие.

Другим важным моментом, на который необходимо обратить внимание потребителю, является то, что в технических характеристиках производители часто не указывают динамические характеристики (быстродействие) уровнемера. Поэтому, если необходима точная информация об уровне непосредственно в процессе его изменения, потребитель должен задать производителю вопросы, проясняющие этот момент.

Также нужно обратить внимание на возможное выпадение конденсата на элементах антенны уровнемера. Если в резервуаре присутствуют насыщенные пары, а температура антенны ниже температуры внутри резервуара, то конденсат обязательно выпадет. И необходимо прояснить вопрос, будет ли его влияние приемлемым.

Идеальный вариант – это перед окончательным выбором модели радарного уровнемера провести опытную эксплуатацию или изучить опыт эксплуатации данной модели другими потребителями на аналогичных объектах.

Перспективы на рынке радарных уровнемеров

Анализ развития рынка радарных уровнемеров показывает, что в настоящее время радарные уровнемеры по основным техническим характеристикам (надежность, точность, диапазон измерения, коммуникационные возможности) в основном удовлетворяют существующим и перспективным требованиям потребителей. Более того, повышение точности выше $\pm 1 \dots \pm 0,5$ мм практически не дает никакого эффекта, так как при таких точностях конечный результат измерения начинают определять факторы, не связанные непосредственно с уровнемером (например, жесткость конструкции резервуаров). Вместе с тем сдерживающим фактором дальнейшего увеличения удельного веса радарных уровнемеров на рынке

является их сравнительно высокая цена. Как было показано выше, основной вклад в стоимость радарного уровнемера вносит стоимость его высокочастотной части (антенна и приемопередающий блок). Поэтому естественно предположить, что основная конкурентная борьба среди производителей развернется в направлении снижения себестоимости высокочастотной части. Причем в сегменте высокоточных уровнемеров (с точностью $\pm 0,5 \dots \pm 1$ мм), где узкий луч ($4\text{--}6^\circ$) является одним из обязательных условий, снижение себестоимости может быть осуществлено или за счет совершенствования технологии изготовления больших антенн, или за счет перехода на более высокие частоты и совершенствования технологии высокочастотных приемопередающих блоков. Так как трудно ожидать существенного улучшения технологии изготовления антенны, второе направление представляется более вероятным.

В сегменте уровнемеров средней и низкой точности ($\pm 3 \dots \pm 10$ мм), где не требуется очень узкий луч, снижение себестоимости высокочастотной части, скорее всего, будет осуществлено за счет перехода на микрополосковые антенны и построения приемопередающего блока на СВЧ-интегральных схемах, номенклатура которых постоянно растет.

В целом у радарных уровнемеров существуют хорошие перспективы снижения цены и тем самым отвоевания все новых позиций на рынке у уровнемеров других типов.

Литература

1. Devine P. Radar level measurement – the user's guide. Burgess Hill: VEGA Controls, 2000.
2. Dr. Michael Heim. Pulse radar for imprecision in tank gauging. Endress+Hauser GmbH.
3. «Радарные системы контроля уровня» Бармин А. СТА/4, 2004.
4. «Радарные уровнемеры», Научно-техническая библиотека Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва.