

Алексей Бармин

Радарные системы контроля уровня

Существует множество самых различных методов контроля уровня, позволяющих получать информацию как о предельных его значениях, так и о текущем значении. Гораздо меньшее число методов реализовано в промышленных системах. Некоторые из реализованных методов являются уникальными, и случаи их применения можно пересчитать по пальцам одной руки, другие — гораздо более универсальны и потому широко используются в серийных системах. Но есть и методы, удачно сочетающие в себе и уникальность, и универсальность. В первую очередь, к ним можно отнести микроволновый бесконтактный метод, в просторечии небезосновательно именуемый радарным. Этот метод, с одной стороны, обеспечивает минимальный контакт измерительного устройства с контролируемой средой, а с другой стороны — практически полностью нечувствителен к изменению её температуры и давления. Причем и температура, и давление могут иметь значения, недопустимые для применения других методов, в первую очередь, контактных. Безусловно, уникальность возможностей не может не сказываться на цене приборов. Но прогресс в этой области настолько велик, а преимущества метода столь очевидны, что можно достаточно уверенно прогнозировать очень широкое распространение радарных систем контроля уровня уже в самом недалеком будущем.

История

Для многих слово «радар» прочно ассоциируется с радиотехническим оборудованием, используемым в системах контроля и управления движением морских, речных и воздушных судов, в первую очередь, военных. Автомобилистам это слово известно в связи с названием приборов, используемых для контроля скорости движения автомобилей. При всех существующих различиях общим остается принцип действия: излученный СВЧ-сигнал отражается от контролируемого объекта, принимается об-

ратно и соответствующим образом обрабатывается. Результатом обработки является значение того или иного параметра объекта: дальность, скорость, направление движения и т.д.

О возможности использования радиоволн для обнаружения удаленных объектов специалисты задумались еще на заре развития радиотехники. В 1897 году в ходе экспериментов на море А.С. Поповым было обнаружено явление отражения радиоволн от корпуса судна, пересекающего направление связи. В 1904 году немецкий инженер Христиан Хюльсмейер (Christian Hülsmeyer) получил патент на устройство, названное им телемобилоскоп, в котором эффект отражения радиоволн использовался для обнаружения кораблей. Хюльсмейер предлагал применить радиопередатчик, вращающиеся антенны направленного действия, радиоприемник со световым или звуковым индикатором, воспринимающий отраженные предметами волны. При всем своём несовершенстве устройство Хюльсмейера содержало в себе основные элементы современного локатора. Однако из-за несовершенства конструкции разработки Хюльсмейера практического применения не получили. Понадобилось тридцать лет, прежде чем идея применения радиоволн для обнаружения самолетов и кораблей смогла быть претворена в реальную аппаратуру. В 1936 году в Англии были развернуты радиолокационные системы военного назначения, которые в годы Второй мировой войны использовались для раннего предупреждения о воздушных налетах немецкой авиации. И, безусловно, использование радиолокационной тех-

нологии в военных целях стало сильнейшим толчком для её развития.

Первые военные радиолокационные системы были строго засекречены, и поэтому для их обозначения использовались различные кодовые наименования. Прижилось и стало общепринятым сокращение, использовавшееся американцами, — RADAR (RADio Detection And Ranging). Вошло это слово и в русский язык, став нарицательным для обозначения всех типов устройств, использующих подобный принцип действия.

Войны, к счастью, рано или поздно заканчиваются. Военные технологии постепенно внедряются в мирную жизнь. Радиолокаторы широко используются в метеорологии, в космических исследованиях для дистанционного зондирования планет и т.д. И вот в 1976 году фирма SAAB первой в мире применяет радарную технологию для контроля уровня сырой нефти, перевозимой супертанкерами. К тому моменту для подобной цели широко использовались поплавковые, буйковые и дифманометрические (разновидность гидростатических) измерительные системы, основной недостаток которых заключался в большой зависимости точности измерения от таких физических параметров контролируемой среды, как температура, давление и плотность. Кроме того, для этих систем требова-

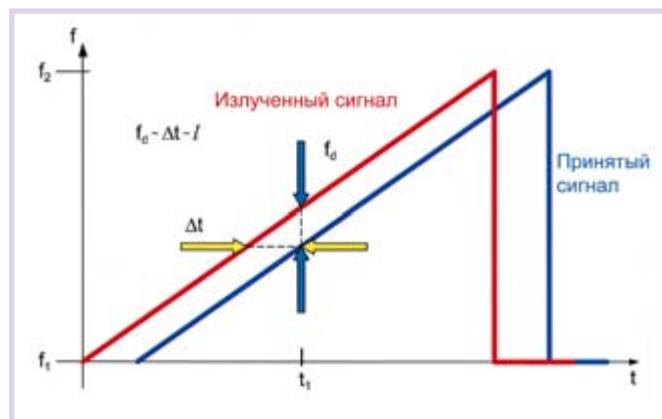


Рис. 1. Принцип измерения расстояния (l) с использованием технологии FMCW

лось довольно частое техническое обслуживание этих систем, связанное с необходимостью удаления различного рода отложений и загрязнений, поскольку все перечисленные системы являются контактными по своей природе. Уровнемеры же, основанные на радарном методе измерения, оказались практически свободными от всех этих недостатков. Именно это обстоятельство и обеспечило их широкое применение в самых различных отраслях промышленности.

Принцип действия

В настоящее время в радарных системах контроля уровня применяются преимущественно две технологии: с непрерывным частотно-модулированным излучением (FMCW — frequency modulated continuous wave) и импульсным излучением сигнала [1].

Технология FMCW еще с 30-х годов прошлого века широко применялась в радиовысотомерах военных и гражданских самолетов. Она же после соответствующей адаптации была использована в первых радарных уровнемерах фирмы SAAB. Эта технология реализует косвенный метод измерения расстояния. Уровнемер излучает микроволновый сигнал, частота которого изменяется непрерывно по линейному закону между двумя значениями f_1 и f_2 (рис. 1). Отраженный от поверхности контролируемой среды (жидкость, сыпучий материал и т.п.) сигнал принимается той же антенной и обрабатывается. Его частота сравнивается с частотой сигнала, излучаемого в данный момент времени. Значение разности частот (f_d) прямо пропорционально расстоянию до поверхности (l). Принцип очень прост, но на пути его практической реализации существует множество технических и технологических проблем. Одной из важнейших, непосредственно влияю-

щих на точность измерения, является обеспечение высокой линейности изменения частоты сигнала и особенно ее температурной стабильности, поскольку уровнемеры, как правило, предназначены для эксплуатации в очень широком температурном диапазоне.

Идеальными для уровнемера FMCW являются условия, когда поверхность контролируемой среды имеет достаточно большую площадь, на ней отсутствуют какие-либо возмущения, а сам резервуар полностью свободен от каких-либо внутренних конструктивных элементов. Однако реальные условия разительно отличаются от идеальных и привносят дополнительные проблемы, связанные с образованием большого числа паразитных эхо-сигналов от элементов конструкции, неровностей поверхности (особенно при контроле сыпучих материалов) и т.п. (рис. 2). Кроме того, приём и передача сигнала осуществляются одновременно. В результате на входе приёмника уровнемера присутствует сложная смесь сигналов с очень большим разбросом по амплитуде. Для выделения частот эхо-сигналов применяется алгоритм, основанный на методе быстрого преобразования Фурье. Для его реализации требуются значительные вычислительные ресурсы и относительно продолжительное время. Результатом преобразования является частотный спектр принятого сигнала, в котором относительная амплитуда каждой частотной составляющей (U) пропорциональна мощности конкретного эхо-сигнала, а величина частотного сдвига пропорциональна расстоянию источника этого эхо-сигнала от излучателя (рис. 3). Выделять полезный эхо-сигнал и игнорировать остальные позволяет специальное программное обеспечение, установленное на сервисном компьютере или встроенное в уровнемер. Главная проблема заключа-

ется в том, что каждому эхо-сигналу в частотном спектре соответствует не одиночная частота, а интервал частот, ограниченный некоторой огибающей. Это вносит дополнительную погрешность в определение расстояния.

В радарных импульсного типа используется метод определения расстояния, основанный на непосредственном измерении времени прохождения СВЧ-импульса от излучателя до контролируемой поверхности и обратно. В результате для отраженного сигнала применение процедуры быстрого преобразования Фурье не требуется. Однако время прохождения сигналом дистанции в несколько метров составляет всего единицы наносекунд. Поэтому для обеспечения измерения столь малых значений с требуемой точностью все-таки требуется применение специальных методов обработки сигнала. Для этого обычно используется преобразование СВЧ-сигнала в сигнал промежуточной частоты ультразвукового диапазона. Так, например, в радарных уровнемерах фирмы Endress+Hauser с несущей частотой 6,3 ГГц промежуточная частота равна 70 кГц, а частота повторения импульсов с 3,6 МГц уменьшается до 44 Гц [2]. После такого преобразования к обработке сигналов радарного уровнемера могут быть легко применимы методы и алгоритмы, используемые в ультразвуковых приборах контроля уровня.

Радарные уровнемеры импульсного типа обладают рядом преимуществ перед устройствами, использующими технологию FMCW. Во-первых, принимаемые эхо-сигналы вне зависимости от природы их источника разнесены во времени, что обеспечивает их более простое разделение. Во-вторых, среднее энергопотребление импульсных уровнемеров составляет единицы мкВт (пиковая мощность при излучении СВЧ-импульса составляет около 1 мВт),

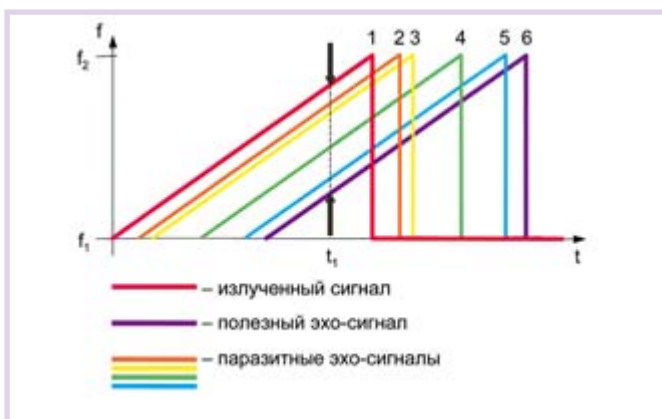


Рис. 2. Паразитные отражения при использовании технологии FMCW

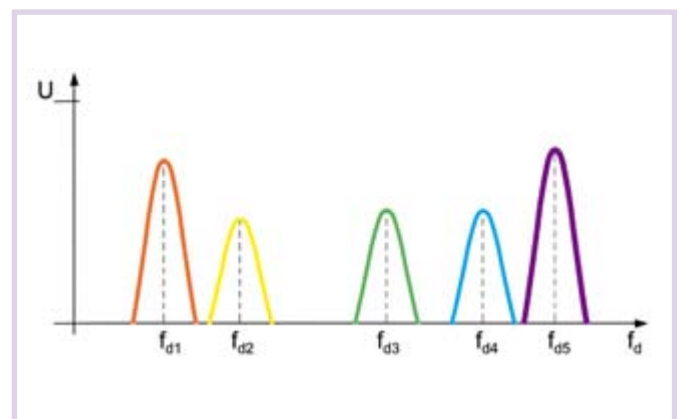


Рис. 3. Частотный спектр эхо-сигнала



Рис. 4. Радарные уровнемеры Siemens Milltronics с рупорной и стержневой антеннами

что позволяет использовать для их подключения двухпроводную схему с питанием от измерительной цепи со стандартным токовым сигналом 4-20 мА; в приборах, работающих по технологии FMCW, энергопотребление существенно выше из-за непрерывного характера

излучения, а также постоянно выполняемой математической обработки эхосигнала. И в-третьих, в импульсных уровнемерах электроника для выполнения первичной обработки сигнала проще, а сама обработка выполняется исключительно аппаратными средствами; в результате благодаря меньшему числу комплектующих надёжность прибора получается потенциально выше.

Конструкция

Одним из самых важных элементов радарного уровнемера является его антенная система. Именно от антенны зависит, какая часть излучённого сигнала достигнет поверхности контролируемого материала и какая часть отражённого сигнала будет принята и передана на вход электронного блока для последующей обработки.

В радарных системах контроля уровня преимущественно используются антенны пяти типов:

- рупорная;
- стержневая;
- трубчатая;
- параболическая;
- планарная.

Рупорная и стержневая антенны (рис. 4) наиболее широко используют-

ся в составе приборов, предназначенных для контроля уровня в технологических установках. Трубчатые антенны (рис. 5) применяются в тех случаях, когда выполнение измерения посредством рупорной или стержневой антенны связано с очень большими трудностями или просто невозможно, например при наличии пены, сильного испарения или высокой турбулентности контролируемой жидкости. Параболические и планарные антенны (рис. 6, 7) используются исключительно в составе систем коммерческого учета нефтепродуктов.

При контроле уровня в закрытых емкостях, а это наиболее частое применение радарных уровнемеров, антенна, находясь внутри резервуара, подвергается воздействию всех неблагоприятных факторов, которые там только могут присутствовать. К ним относятся и высокое давление, и высокая температура, и агрессивные испарения, и пыль, и т.д. Безусловно, конструкция антенны и материалы, используемые для ее изготовления, должны всему этому успешно противостоять. Кроме того, конструкция самих резервуаров отличается огромным разнообразием и поэтому способна создать массу проблем



Рис. 5. Радарный уровнемер Siemens Milltronics с трубчатой антенной



Рис. 6. Радарный уровнемер Endress+Hauser с параболической антенной



Рис. 7. Радарный уровнемер Endress+Hauser с планарной антенной

при установке уровнемера. Вот почему у ведущих мировых производителей радарных уровнемеров в программе поставок имеется большое количество вариантов исполнения оборудования, и особенно антенных систем.

Электронный блок радарного уровнемера составляет единое целое с антенной системой вследствие особенностей используемого принципа действия. Данный блок отвечает как за формирование зондирующего сигнала, так и за обработку принятого эхо-сигнала. Измерительная информация (расстояние, уровень, объем и т.п.) может либо просто отображаться на встроенном индикаторе, либо выдаваться вовне с помощью различных аналоговых и цифровых интерфейсов. В простейшем случае применяется стандартная токовая петля 4-20 мА с 2- или 3-проводной схемой подключения. В последнее время в таких приборах обычно имеется поддержка HART-протокола, который используется, в частности, для удаленной настройки измерительной системы. Для этой же цели производители оборудования предлагают специальные программные продукты, функционирующие на сервисном компьютере и обес-

печивающие в удобной и наглядной форме настройку, калибровку и диагностику уровнемеров. Одной из важнейших функций таких программ является построение профиля отраженного сигнала по всей трассе измерения и отстройка от паразитных эхо-сигналов. На рис. 8 в качестве примера приведена экранная форма программы Dolphin Plus фирмы Siemens Milltronics, иллюстрирующая этот процесс.

ОГРАНИЧЕНИЯ

Вне зависимости от используемого принципа в радарных уровнемерах применяются СВЧ-сигналы с несущей частотой, лежащей в диапазоне от 5,8 до 26 ГГц. К сожалению, не существует какой-то одной оптимальной частоты для всех возможных случаев применения радарных систем контроля уровня: любое преимущество в одном случае может оказаться существенным недостатком в другом. С этой позиции и рассмотрим особенности низкочастотных и высокочастотных радарных уровнемеров.

Антенная система

В высокочастотных приборах антенна имеет меньшие размеры и при равных размерах с антенной низкочастотного прибора обеспечивает более узкую диаграмму направленности. Это позволяет использовать для установки уровнемера отверстия в резервуаре гораздо меньших размеров, что в некоторых случаях может иметь решающее значение. Сравните: рупорная антенна радарного уровнемера диапазона 26 ГГц диаметром 40 мм имеет диаграмму направленности приблизительно такой же ширины, что и антенна уровнемера диапазона 6 ГГц диаметром 150 мм. Более узкая диаграмма направленности очень важна для получения эхо-сигнала с наименьшим числом паразитных отражений от различных внутренних конструктивных элементов резервуара, таких как швы, дефлекторы, мешалки и т.д. Для высокочастотных уровнемеров ситуация осложняется тем, что из-за более короткой длины волны излучения паразитные эхо-сигналы будут формироваться от более мелких объектов, которые для низкочастотных уровнемеров будут просто незаметны.

Контролируемая среда

По этой же причине высокочастотные уровнемеры более чувствительны к наличию разного рода неровностей на контролируемой поверхности, которые вызывают повышенное рассеивание зондирующего излучения и, как следствие, снижают уровень полезного эхо-сигнала. Вот почему низкочастотные уровнемеры лучше приспособлены для контроля уровня жидкостей с неспокойной поверхностью и сыпучих материалов.

Конденсат и отложения материала

Высокочастотные уровнемеры более чувствительны к наличию конденсата и отложениям материала на поверхности антенны, поскольку эти факторы вызывают более сильное ослабление именно высокочастотного сигнала. Кроме того, одинаковый уровень отложений или конденсата сильнее сказывается на эффективности работы антенн с меньшими размерами. В то же время, например, рупорная антенна диаметром 6 дюймов для диапазона 5,8 ГГц практически нечувствительна к конденсату и гораздо более устойчива к отложениям материала на ее поверхности.

Испарения и запылённость

Для контроля уровня при наличии высокого уровня пыли (цемент) или испарений (паровой котёл) низкочастотные уровнемеры имеют преимущество благодаря меньшему ослаблению сигнала, вызываемому указанными факторами.

Пена

Влияние пены на результат измерения определяется такими её параметрами, как плотность, диэлектрическая проницаемость и проводимость. Сухая пена достаточно легко проникаема для СВЧ-излучения. В то же время, мокрая пена, присутствующая, например, в броидильных чанах, представляет для него труднопреодолимое препятствие. В общем же случае низкочастотные уровнемеры показывают лучшие результаты работы при наличии пены на поверхности контролируемого вещества. Так, например, тонкий слой пены моющего средства на поверхности воды непреодолим для сигнала высокочастотного уровнемера, в то время как уровнемер диапазона 5,8 ГГц позволяет производить измерения при толщине слоя пены

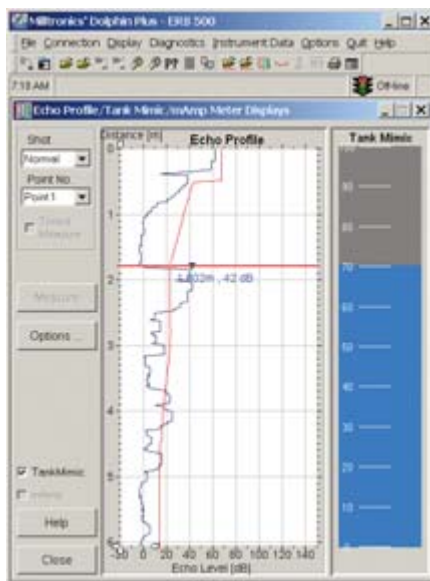


Рис. 8. Экранная форма программы Dolphin Plus

ны до 150 мм и даже выше. Здесь следует иметь в виду, что толстый слой пены способен вносить небольшую дополнительную погрешность в результат измерения из-за различия скорости распространения СВЧ-сигнала в воздушной среде и пене.

Зона нечувствительности

Для высокочастотных уровнемеров характерны гораздо меньшие размеры зоны нечувствительности по сравнению с низкочастотными, поэтому они имеют дополнительное преимущество при использовании в резервуарах и успокоительных трубах небольшого размера.

Точность измерения

Между радарными уровнемерами импульсного типа и уровнемерами, использующими технологию FMCW, не существует принципиального различия по достигаемой точности измерения.

Приборы, используемые для контроля уровня в технологических установках, обладают точностью порядка нескольких миллиметров. Реально же достигаемая точность измерения определяется и такими факторами, как конкретные условия применения, тип и конструктивное исполнение антенны, качество электронных компонентов, возможности программного обеспечения обработки эхо-сигнала.

Существует особый класс радарных уровнемеров, предназначенных для использования в системах коммерческого учета нефтепродуктов. Для этих приборов гарантированная точность измерения должна быть не хуже ± 1 мм. Для ее обеспечения предпринимается ряд специальных мер. В частности, использу-

ются антенны параболического или планарного типа для получения максимально узкой диаграммы направленности излучения, а в алгоритм обработки эхо-сигнала дополнительно вводится оценка фазы сигнала. Кроме того, несмотря на очень малую зависимость от температуры и давления, в результат измерения также вводится поправка на изменение значения этих параметров в контролируемом резервуаре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря своим уникальным возможностям радарные уровнемеры, использующие микроволновый бесконтактный метод измерения, способны обеспечить достоверной информацией о контролируемом параметре в самых разнообразных условиях применения. Безусловно, некоторым сдерживающим фактором является относительно высокая стоимость оборудования. Однако следует иметь в виду, что при его использовании доля эксплуатационных расходов в общей структуре затрат существенно ниже по сравнению с традиционными средствами измерения. Кроме того, наблюдающийся значительный прогресс в этой области техники в сочетании с жесткой конкуренцией между производителями неизбежно ведет к постоянному снижению цен. Поэтому будущее радарных уровнемеров видится вполне оптимистичным.

Вместе с тем нельзя рассматривать этот класс оборудования как средство для решения всех задач измерения уровня. Только учитывая особенности используемого метода, грамотно осуществляя выбор конфигурации уровнемера, скрупулезно прорабатывая способ и место монтажа, а затем также скрупулезно его осуществляя и, наконец, тщательно выполняя настройку всей системы, можно получить ожидаемый результат. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Devine P. Radar level measurement — the user's guide. — Burgess Hill: VEGA Controls, 2000.
2. Dr. Michael Heim. Pulse radar for mm-precision in tank gauging. — Endress+Hauser GmbH.

**А.В. Бармин — сотрудник
фирмы ПРОСОФТ
119313 Москва, а/я 81
Телефон: (095) 234-0636
Факс: (095) 234-0640
E-mail: info@prosoft.ru**