

Прецизионные промышленные системы ЧМ-радиолокации ближнего действия. Методическая погрешность измерения и её минимизация

Б.А. Атаянц, В.В. Езерский, С.М. Смольский, Б.И. Шахтарин

Рассмотрены основные принципы построения прецизионных частотных дальномеров, предназначенных для высокоточного измерения малых и сверхмалых расстояний в промышленных системах автоматического управления технологическими процессами. На основании анализа существующих систем выделены три группы таких приборов, отличающихся по точности измерения расстояния и сложности реализации. Показаны общие подходы, позволяющие разрабатывать подобные приборы на современном научно-техническом уровне и успешно осуществлять их практическую реализацию.

The basic principles of precision frequency range-finder implementation intended for high-accuracy measurement of small and ultra-small distance are considered for industrial automatic control of the technological processes. On the basis of the existing system analysis three groups of such devices are allocated differing by distance measurement accuracy and the implementation complexity. The general approaches are discussed allowing to develop these devices at modern scientific and technological level and to execute its practical implementation.

Введение

Интенсивное развитие различных отраслей промышленности и возникновение систем автоматического управления производственными процессами привели в конце 60-х годов прошлого века к широкому применению в промышленности радиолокационных устройств [1 – 3]. Часто требуется измерить очень малые расстояния (от долей метра до нескольких десятков метров). К числу таких систем, например, можно отнести различные системы измерения уровня заполнения технологических резервуаров (уровнемеры), системы точного позиционирования сложного технологического оборудования (вплоть до порталных кранов и др.), системы определения расстояния до препятствий и скорости на транспорте (автомобильном, железнодорожном и морском) и т.д. Основы для разработки таких систем были заложены в предыдущие десятилетия в процессе развития различных военных применений [4 – 19]. Причём во многих случаях требуется осуществлять непрерывное бесконтактное слежение за расстоянием, а часто и за скоростью его изменения. Часть этих задач может быть решена радиоволновыми методами [1], но весь спектр приложений могут реализовать только радиолокационные системы. В большинстве случаев эти задачи успешно решает частотный дальномер (ЧД), относящийся к классу частотно-модулированных (ЧМ) радиолокационных станций (РЛС) с непрерывным излучением. Требования по точности измерения расстояния как правило на один-два порядка превышают аналогичные требования в традиционных системах ближнего дейст-

вия. В этих условиях те факторы, которые слабо влияли в традиционных применениях, начинают играть доминирующую роль и должны соответствующим образом учитываться при анализе характеристик и разработке подобных систем.

Пионерами в промышленном применении ЧД были шведская фирма SAAB и голландская Elnaf-Nopius [3, 20, 25], использовавшие их для измерения уровня заполнения различных технологических резервуаров. Фирма SAAB в 1975 г. поставила на эксплуатацию свой первый уровнемер. До середины 90-х годов она произвела более 15000 уровнемеров. В 1976 г. первый уровнемер создала немецкая фирма Krohne [3]. В этом же году получил задание на разработку уровнемера для танкеров Рязанский завод «Теплоприбор». Как отечественные, так и зарубежные первые уровнемеры не обладали высокой точностью измерения. Их погрешность по расстоянию составляла единицы и даже десятки сантиметров. Только в начале девяностых годов ведущими производителями была практически достигнута точность измерения 1 см [3]. Точность 2 см имел уровнемер «Луч-2», разработанный и освоенный в серийном производстве на Рязанском заводе «Теплоприбор». Однако точность 1 – 2 см во многих случаях недостаточна для решения задач промышленности. Для увеличения точности измерения понадобился гораздо более высокий уровень развития СВЧ-техники и применение современных аппаратуры и методов цифровой обработки сигналов. На увеличение точности с 1 см до 1 мм ушло ещё почти 10 лет.

Потребности промышленности в таких приборах огромны. Большой экономический эффект обеспечивается не только вследствие устранения ручных методов измерения, но и благодаря высокой надёжности, точности, оперативности и простоте внедрения в автоматизированные системы управления производством.

В настоящее время существует множество фирм за рубежом и в России, занимающихся разработкой и выпуском подобных приборов и постоянно совершенствующих их характеристики.

Развитие выпускаемых приборов находит своё отражение в патентной литературе и в периодической печати. Наиболее интересные работы [20 – 63]. Среди опубликованных работ важными, определяющими основные этапы развития ЧМ ЧД промышленного назначения можно считать [20, 22, 23, 29], основанные на весовом методе оценки разностной частоты; [21, 24], предлагающие дополнительную медленную фазовую модуляцию ЧМ-сигнала; [22, 27, 28, 31, 35, 48], использующие линию задержки в качестве опорного эталонного канала; [25, 45, 51, 60], применяющие калибровочный режим работы для измерения и компенсации нелинейности модуляционной характеристики (МХ) передатчика на основе так называемого режима ступенчатой частотной модуляции непрерывного сигнала (зарубежная аббревиатура – FSCW); [59, 60], использующие цифровой синтез частоты передатчика в режиме FSCW; [41, 43, 51 – 54], рассматривающие особенности работы частотных дальномеров в условиях наличия мешающих отражений на основе различных вариаций метода максимума правдоподобия или методов высокого разрешения (например, метод MUSIC [51]).

У нас в стране книги по теории ЧМ-радиолокаторов были изданы в 60 – 70-х годах прошлого века. Кроме работ, перечисленных выше, можно назвать [64, 65]. Наиболее известная и основательная из всех – монография А.С. Виноцкого [5]. Однако в этих работах не отражены современные методы формирования и обработки сигналов, учитывающие революционные изменения в элементной базе. В конце 80-х годов опубликована монография [66]. В ней на серьёзном уровне рассмотрены основы теории и принципы построения радиотехнических систем обнаружения и измерения ближнего действия и особенности реализации систем, предназначенных для измерения параметров движения транспортных средств и охранных радиотехнических систем. Из зарубежных можно отметить работы [68, 69]. Последней серьёзной

работой можно считать монографию [70]. В ней применительно к радиолокационным системам измерения малых расстояний рассматриваются теоретические основы обработки принятого сигнала и передающие устройства на основе автодинного принципа работы. Поэтому в настоящее время существует необходимость осмысления последних достигнутых результатов и обобщения разрозненных сведений, имеющихся в литературе и полученных авторами в процессе работы над новыми приборами. В этом и состоит цель настоящего обзора.

1. Постановка проблемы

Специфика применения ЧД в промышленных системах измерения малых расстояний заключается в следующем:

- диапазон измеряемых расстояний составляет обычно от долей метра до 30 – 50 м при требуемой точности измерения от единиц сантиметров до 1 мм и даже до долей миллиметра;

- во многих случаях измерения проводятся в сложных помеховых ситуациях, часто в замкнутых объёмах при наличии различного рода мешающих отражателей. Наблюдается множество переотражений радиоволн от этих элементов. Если при измерении уровня контролируемый материал имеет невысокое значение диэлектрической постоянной и слабо поглощает радиосигнал, то наблюдается ещё и отражение от дна резервуара. Однако все мешающие отражатели (их параметры) в рабочей области дальномеров могут быть заранее найдены;

- приём сигнала осуществляется на фоне шумов, возникающих в первых каскадах СВЧ-узлов и фазовых шумов передатчика;

- на результат измерения сильное влияние оказывает нелинейность модуляционной характеристики передатчика;

- измерения необходимо проводить в условиях значительного изменения параметров окружающей среды (температуры, влажности и давления) и среды в рабочей зоне в условиях повышенной запылённости среды распространения радиоволн и наличия пара, конденсата влаги и пыли на антенне;

- для обработки сигналов такой измерительной системы имеется лишь ограниченный объём отсчётов сигнала, причём на очень малой измеряемой дальности для анализа могут быть получены всего несколько периодов сигнала (3 – 4 периода и менее). Кроме того, по ряду причин эти сигналы могут быть сильно искажены, т.е. их

