



Переносной радиометрический измеритель для определения объёмов нефтяных загрязнений водных акваторий

Владимир Бирульчик, Александр Рынин, Михаил Советкин

Особое внимание в статье уделяется физическим основам работы поляризационного радиометрического измерителя, а также проблеме выбора компонентов на этапе его создания с учетом условий эксплуатации в районах Западной Сибири и высоких требований к надёжности прибора. Рассмотрены особенности применения и возможности расширения круга решаемых измерителем задач.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений обеспечения качества функционирования производственно-хозяйственных комплексов является внедрение в их технологические схемы методологии экологического мониторинга.

По данным ООН, ежегодно в моря и океаны попадает более 6 млн. тонн различных нефтепродуктов. В последние годы техногенные аварии стали приобретать характер экологических катастроф. Это особенно ярко проявилось при крушениях нефтеналивных судов и танкеров у берегов Аляски и Канады, Японии (крушение танкера «Находка»), Испании (крушение танкера «Престиж»), а также при авариях на трубопроводах (в Башкирии, Татарии и др.), когда нефтяными загрязнениями были поражены огромные площади, а ликвидация последствий потребовала многомиллиардных затрат. Нефтяные загрязнения нарушают естественные физико-химические процессы, протекающие в водных бассейнах, самым пагубным образом воздействуют на морскую, речную и озерную флору и фауну.

С проблемой защиты водных акваторий тесно связана проблема обнаружения в них нефти и нефтепродуктов. А с проблемой эффективной очистки и

удаления нефтепродуктов связана проблема определения объёмов загрязнений.

Удачным опытом решения этих проблем явилось создание переносного радиометрического измерителя объёмов нефтяных загрязнений водных акваторий, принцип работы которого основан на применении поляризационного метода радиометрического дистанционного зондирования. В силу



Самолет. Разлив нефти вблизи нефтепровода

особенностей используемого метода данный измеритель является пассивным (неизлучающим) прибором, и поэтому он безопасен для окружающей среды и людей, включая обслуживающих его операторов.

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Радиометрический метод дистанционного зондирования основан на регистрации теплового излучения участков подстилающей поверхности. Подстилающая поверхность включает фрагменты естественного ландшафта (почвы, лесных массивов, водоемов и т.д.) и элементы инфраструктуры магистралей, инженерных сооружений, населенных пунктов и т.п. Различные фрагменты имеют существенный разброс физических параметров, которые определяют интенсивность их собственного радиоизлучения. Помимо этого, в интенсивность радиоизлучения участка поверхности вносит вклад переотраженное в направлении визирования собственное радиоизлучение окружающей среды. Наблюдаемая интенсивность радиоизлучения различных фрагментов имеет свою характерную

частотную зависимость и зависимость поляризационных характеристик радиоизлучения. Таким образом, из результатов измерений интенсивности, поляризационных и частотных зависимостей радиоизлучения можно во многих случаях выделить и отождествить отдельные фрагменты с физическими параметрами, обеспечивающими контраст таких фрагментов по отношению к окружающему фону.

Результаты анализа условий формирования радиоярких контрастов при дистанционном зондировании водных поверхностей указывают на возможность обнаружения на их фоне радиометрическим методом участков разливов нефти за счет использования особенностей динамики отражательных свойств двухслойной среды, при этом характеристики радиоизлучения дают исчерпывающую информацию о параметрах участков разливов.

В частности, наблюдаемые периодические вариации яркостной температуры позволяют определить толщину плёнки нефти, а по пространственному распределению поля яркостных температур на участке загрязнения можно оценить объем нефтепродуктов в разливе.

Кроме того, известно, что радиоизлучение участка разлива нефти на поверхности воды сильно поляризовано, а степень поляризации периодически варьируется с изменением толщины пленки нефти. В силу этого, а также учитывая, что наблюдения ведутся на фоне сильно поляризованного излучения водной поверхности, необходимо выбрать оптимальные условия для наблюдений. Анализ показывает, что при выборе угла визирования участка разлива нефти около 55 угловых градусов от надира (угол Брюстера) интенсивность излучения, наблюдаемая на вертикальной составляющей поляризации, не зависит от наличия пленки нефти на поверхности воды и может использоваться в качестве опорного уровня. При этом наличие вариаций интенсивности излучения относительно фонового уровня, наблюдаемых на горизонтальной поляризации, служит основанием для принятия решения об обнаружении участка разлива нефти. Поэтому в поляризационном методе радиометрических измерений измеряемым параметром на выходе системы является отношение интенсивностей поляризационных составляющих наблюдаемого излучения, которое явля-



Рис. 1. Внешний вид прибора КТС РМК-Н

ется расчетной величиной и непосредственно связано с толщиной слоя нефти в разливе.

Как показали результаты испытаний и анализ, радиометрический поляризационный метод контроля разливов нефти обеспечивает измерение толщины пленок нефти в пятне загрязнения вне зависимости от его размеров и степени заполнения диаграммы направленности. Это обеспечивает высокий потенциал метода как по обнаружению участков разливов нефти, так и по определению полной массы нефтепродуктов в разливе. Другим достоинством данного метода является возможность всепогодной работы соответствующих систем, обеспечиваемая за счет методического учета вариаций как контрастных составляющих в наблюдаемом излучении, так и параметров антенны и радиометра. С другой стороны, в поляризационном методе измерений полностью реализуется потенциал известного радиометрического метода контроля по измерениям интенсивности сигнала.

Радиометрический метод обнаружения разливов нефти на фоне подстилающих покровов по их поляризационным контрастам получил высокую оценку и признание на международном уровне и считается наиболее перспективным для решения задач дистанционного зондирования [1].

ДВУХЧАСТОТНЫЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ РАДИОМЕТР

На основе поляризационного метода Нижегородским предприятием ФГУП «НПП „Полет“» с участием научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) был разработан и изготовлен переносной дистанцион-

ный радиометрический измеритель толщины слоя нефти на водной поверхности (прибор КТС РМК-Н).

Измеритель представляет собой двухчастотное двухполяризационное автономное приемное устройство (рис. 1), содержащее в каждом канале рупорную антенну, поляризационный приемник прямого усиления, общий для всего устройства микропроцессор и ортогонально расположенные датчики углового положения [2].

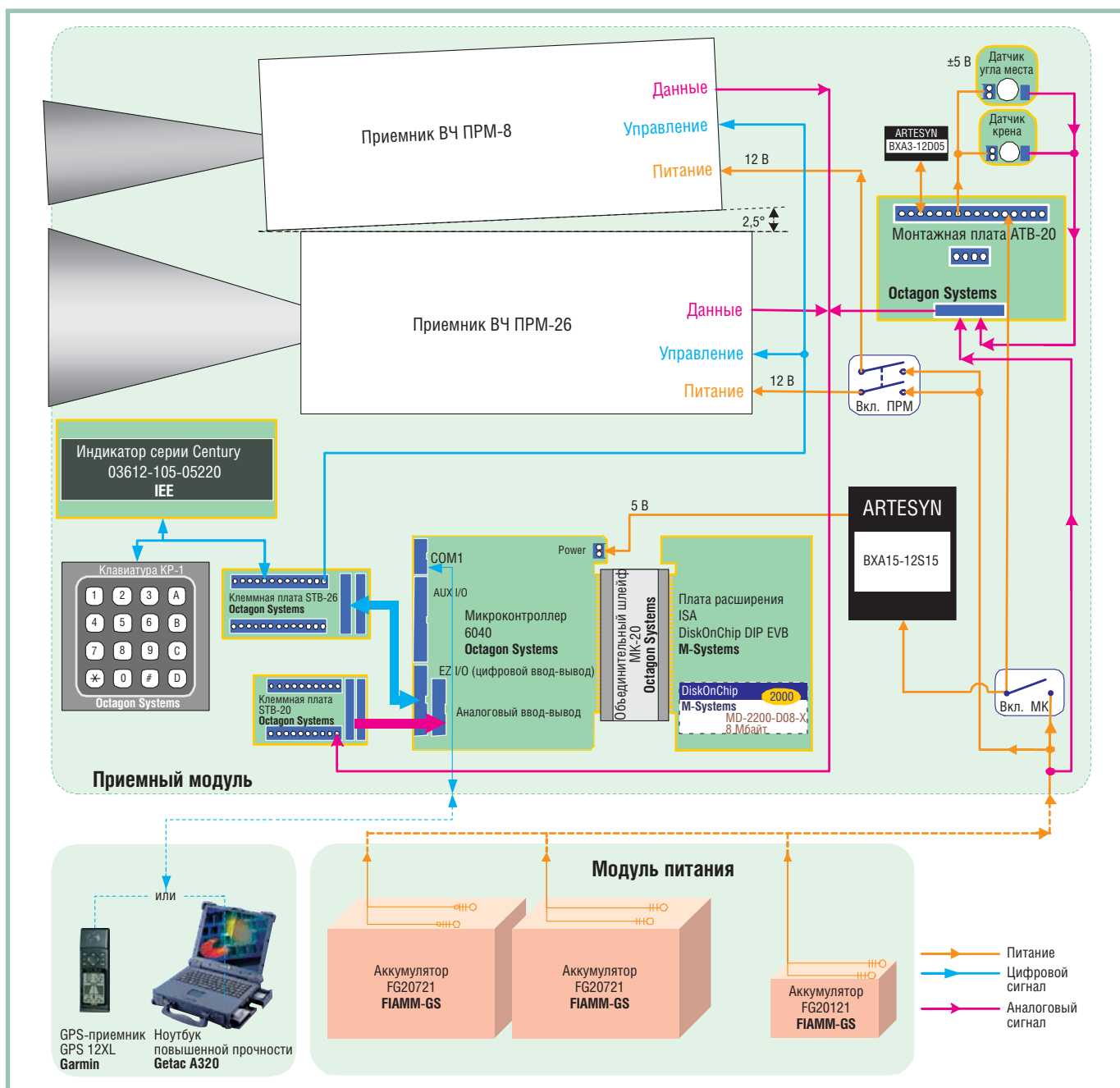
Назначение прибора

Прибор КТС РМК-Н, доставляемый к месту применения любыми транспортными средствами и эксплуатируемый оператором вручную, предназначен для обеспечения:

- неконтактного определения толщины слоя нефти на водной поверхности;
- регистрации результатов наблюдений с привязкой к координатам (с помощью приемника GPS) и выдачи их в IBM PC совместимый компьютер;
- сопровождения развития нефтяных выбросов и процессов ликвидации экологических эксцессов путем оперативного анализа динамики очаговых и остаточных (локальных) явлений, связанных с присутствием нефти.

Основные принципы работы прибора

Определение толщины слоя нефти на водной поверхности основано на известной зависимости величины отраженного сигнала (характеризуется интерференционной суммой сигналов, отраженных от границ двухслойной среды) от толщины измеряемого слоя. Измерения проводятся на ортогональных поляризациях; совместная обработка соответствующих составляющих исключает необходимость использования калибровки прибора по абсолют-



Условные обозначения: Вкл. ПРМ — включатель приёмника радиометрического; Вкл. МК — включатель микроконтроллера

Рис. 2. Структурная схема прибора КТС РМК-Н

ным значениям радиояркости температуры и сводит решение задачи к определению нормированных интегральных коэффициентов отражения.

Кроме того, в этом случае не требуется знания коэффициентов полезного и направленного действия антенны радиометрического приёмника, измерения уровня аппаратных флуктуационных помех, проведения специальных калибровочных работ для получения зависимостей измеряемых радиояркости температур от снимаемых с выходов детекторов радиометрических каналов аналоговых напряжений. Последнее означает, что исключается вли-

яние на точность оценки методических погрешностей измерений коэффициентов усиления принимаемых сигналов и смещений нуля шкалы радиометра, имеющих место в традиционных решениях.

Для необходимых вычислений в ходе измерений необходимо знать значения следующих параметров:

- реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости нефти (самая трудоемкая задача, требующая для уточнения значений параметров, наличия калибровочного стенда);
- температуры воды (измеряется обычным ртутным термометром, что

является преимуществом ручного радиометра перед аналогичными приборами, размещенными на борту летательных аппаратов);

- реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости воды (сильно зависят от температуры, вычисляются аналитически по известным соотношениям Дебая);
- угла визирования (в нашем случае передается с датчика угла наклона, изменяется в пределах $55 \pm 0,5^\circ$);
- длины волны приемников (задается в файле конфигурации).

Измерения проводятся следующим образом.

Ручным термометром измеряется температура воды под слоем нефти и записывается в память микроконтроллера через клавиатуру. Вводятся коор-

динаты точки измерения (или с помощью подключаемого к COM-порту прибора GPS-приемника, или вручную с клавиатуры). В рабочем положении прибор находится на плече оператора (на основе усреднённых антропометрических данных и габаритов прибора для расчётов эта высота выбрана равной 1,6 м, что при условии пересечения центральных осей обеих антенн в точке измерения определило величину угла между ними около 2,5 градусов). Раструбы антенн визуальным (используется прицельная рамка на приборе) направляются на пятно разлива нефти. Угол наклона составляет 55° относительно надира (35° относительно поверхности земли) и контролируется датчиком угла наклона прибора. Угол крена контролируется датчиком угла крена прибора. Величины сигналов ортогональных составляющих поляризации записываются в память микроконтроллера.

Начинает работу программа определения толщины пленки. Результат расчета выводится на экран дисплея и записывается в файл измерений. Затем

через COM-порт прибора с помощью нуль-модемного кабеля и любой терминальной программы данные измерений передаются на персональный компьютер.

Для определения объёма загрязнения водоем, залитый нефтью, обходится по периметру с замером толщины пленки на разных участках и записью соответствующих координат. Далее результаты могут быть обработаны практически любой GIS-программой (в нашем случае применяется картографическая программа Maple) с целью вычисления площади водоема. Замеры толщины плёнки усредняются, и при известной площади водоема объём нефтяного загрязнения можно считать известным.

Если водоем не полностью покрыт нефтью (кстати, для стоячей воды это исключительно редкий случай) или загрязнение занимает очень небольшую площадь, то достаточно знать площадь пятна диаграммы направленности на поверхности измерения в зависимости от высоты подъема прибора (такая таблица к прибору прилагается). Напри-

мер, для высоты 1,6 м площадь пятна диаграммы направленности составляет около 2 кв. м. Отсюда, в частности, следует и минимально определяемый объём разлитой нефти 0,5 литра (минимальная измеряемая толщина слоя нефти 0,2 мм).

Основные технические характеристики прибора представлены в табл. 1, а его структурная схема показана на рис. 2.

Выбор компонентов

Выбор компонентов оборудования для управления, приема и обработки сигналов, визуализации расчетов и передачи их на удаленный компьютер обусловлен, с одной стороны, требованиями к массогабаритным параметрам прибора, а с другой — необходимостью обеспечения надежности оборудования при эксплуатации в естественных природных условиях.

Основным требованием к прибору является измерение плёнок нефти толщиной 0,2...12 мм, и поскольку он проектировался для эксплуатации в условиях Западной Сибири, то данная задача должна решаться в диапазоне температур -20...+50°C; при этом среднее время безотказной работы прибора должно быть не менее 1500 часов, а срок службы — не менее 5 лет.

Радиометрические приемники

Радиометрические приемники ВЧ ПРМ-8 и ВЧ ПРМ-26 диапазонов соответственно 8 и 26 мм (ЗАО «НПП „Салют-27“») выполнены в герметичных корпусах с волноводным гермоотком на входе и низкочастотным выходом через разъем типа РП-15.

Приемники осуществляют преобразование высокочастотного шумового сигнала в аналоговый. Каждый приёмник содержит элементы волноводного тракта соответствующего диапазона (переключатель поляризации, циркулятор, модулятор), малошумящий усилитель, квадратичный детектор, усилитель низкой частоты и синхронный детектор.

Приемники имеют внешнее управление от микроконтроллера переключателем поляризации, модулятором и усилителями.

Выходной сигнал у обоих приемников — аналоговый, с максимальной амплитудой напряжения ± 5 В.

Антенны, жестко связанные с приемниками, представляют собой кони-

Таблица 1. Основные характеристики прибора

Полоса рабочих частот, ГГц		
Канал F1		33...35
Канал F2		11,7...12,7
Чувствительность приемных устройств, °К/с		
Канал F1	вертикальная поляризация	не хуже 0,12
	горизонтальная поляризация	не хуже 0,10
Канал F2	вертикальная поляризация	не хуже 0,08
	горизонтальная поляризация	не хуже 0,09
Ширина диаграммы направленности по половинной мощности, градус		
Канал F1	вертикальная поляризация	9,9
	горизонтальная поляризация	9,45
Канал F2	вертикальная поляризация	11,68
	горизонтальная поляризация	10,73
Диапазон измерения толщины слоя нефти, мм		0,2...12,0
Пределы допускаемой абсолютной погрешности, мм		
в диапазоне толщин 0,2...0,6 мм		$\pm 0,1$
в диапазоне толщин 0,6...4,0 мм		$\pm 0,2$
в диапазоне толщин 4,0...6,0 мм		$\pm 0,4$
в диапазоне толщин 6,0...12,0 мм		$\pm 0,6$
Габаритные размеры, мм		
Приемный модуль		255×580×400
Модуль питания		132×175×270
Масса, кг		
Приемный модуль		не более 11
Модуль питания		не более 7,1

ческие рупорные антенны с диэлектрическими вставками, обеспечивающими выравнивание диаграмм направленности для ортогональных составляющих поляризации.

Микроконтроллер

Для обеспечения функционирования измерителя управляющий микроконтроллер должен иметь в своем составе:

- не менее четырех каналов АЦП (два канала — для сигналов с выходов приёмников, два — для сигналов от датчиков углового положения);
- каналы цифрового ввода-вывода (для клавиатуры, дисплея и управления режимами работы приёмников);
- последовательный порт для подключения внешнего компьютера и приёмника GPS.

В результате анализа возможных вариантов реализации прибора, а также по результатам исследований независимых экспертов был выбран микроконтроллер модели 6040 фирмы Octagon Systems со встроенными цифровыми и аналоговыми каналами ввода-вывода, удовлетворяющий всем перечисленным требованиям.

Для накопления данных измерений и обеспечения возможности расширения области решаемых задач в состав микроконтроллера был добавлен флэш-диск DiskOnChip 2000 на ISA-плате расширения фирмы M-Systems.

Клавиатура и дисплей

Для управления прибором во время измерений используется матричная 16-клавишная клавиатура КР-1 фирмы Octagon Systems. Клавиатура предназначена для ввода цифровой информации (например, температуры, даты, времени и т.п.) и команд управления прибором.

Дисплей должен сочетать высокую яркость изображения в условиях естественного освещения, низкое энергопотребление при функционировании в расширенном диапазоне температур и возможность подключения к микроконтроллеру 6040. Оптимальным выбором оказался вакуумно-флуоресцентный матричный дисплей фирмы IEE серии Century 03612-105-05220 с сине-зеленым светофильтром, который почти в 2 раза улучшает видимость в прямых солнечных лучах.

Датчики угла

Датчики угла ДК-1 (ООО «Микро-сенсорные технологии») — малогабаритные инклинометры с аналоговым выходным сигналом, пропорциональным углу наклона датчика. Инклинометр представляет собой дифференциальный ёмкостный преобразователь наклона на базе проводящей жидкости. Инклинометр спроектирован так, что имеет линейную зависимость выходного сигнала от угла наклона в одной рабочей плоскости и практически не изменяет показания при наклоне в другой (нерабочей) плоскости. Для определения положения прибора в пространстве используются два расположенных под углом 90° друг к другу инклинометра.

Преобразователи напряжения

Электропитание необходимо подавать на следующие компоненты прибора:

- два радиометрических приемника (12 В);
- микроконтроллер (5 В);
- два датчика угла (± 5 В).

Поскольку основное питание прибора осуществляется от источников с

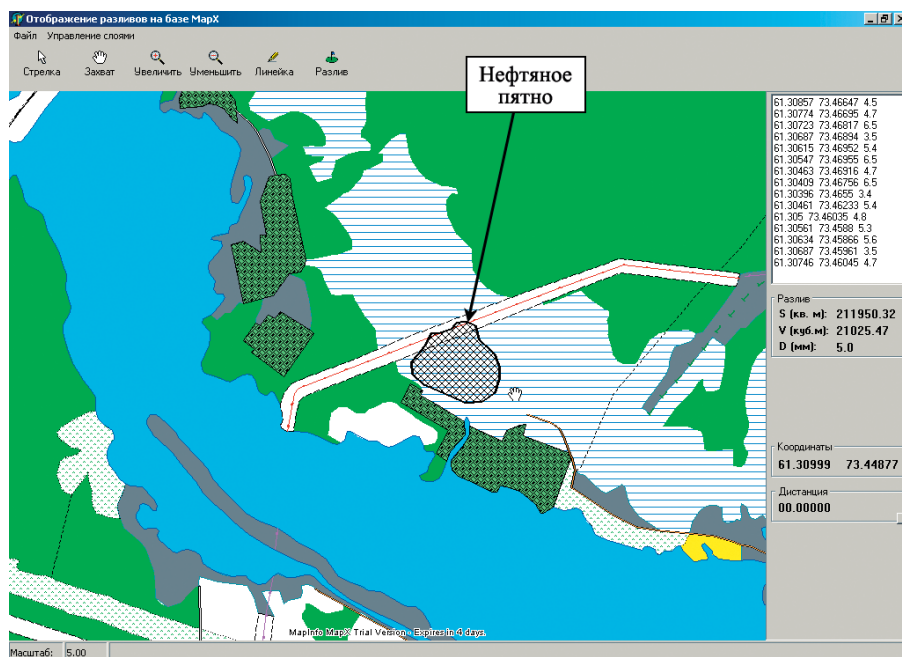


Рис. 3. Параметры нефтяного загрязнения в АРМ эколога

номиналом 12 В, то для питания микроконтроллера использовался преобразователь напряжения ВХА15-12S05, а для питания инклинометров — ВХА3-12D05. Оба преобразователя производства фирмы Artesyn Technologies. Питание клавиатуры и

дисплея производится непосредственно через микроконтроллер 6040. В радиометрических приемниках есть встроенные преобразователи напряжения, поэтому питание к ним подводится непосредственно от аккумуляторов.

Источники питания

Для питания радиометрических приемников используются два аккумулятора: FG20721 (12 В, 7,2 А·ч) и FG 0121 (12 В, 1,2 А·ч). Питание микроконтроллера (с дисплеем и клавиатурой) и датчиков угла осуществляется от второго аккумулятора FG 20721. Аккумуляторы и зарядные устройства для них производятся фирмой FIAMM. Контроль напряжения аккумуляторов осуществляется микроконтроллером 6040 через АЦП.

Кабели и интерфейсные модули

Дисплей, клавиатура и каналы управления приемниками подключаются к микроконтроллеру (цифровой вход-выход) через клеммную плату STB-26.

Аналоговые сигналы от радиометрических приемников подаются на вход АЦП микроконтроллера через клеммную плату STB-20. Через эту же плату на вход АЦП с монтажной платы АТВ-20 подаются сигналы от датчиков угла и преобразованные смонтированными на плате делителями значения напряжений аккумуляторов для системы контроля прибора.

Внешние устройства

Для расширения функциональности измерителя при эксплуатации предусмотрена возможность подключения к нему таких внешних устройств, как приемник GPS и IBM PC совместимый компьютер. Связь с приемником GPS, например типа Garmin 12XL, осуществляется через последовательный порт микроконтроллера. К этому же порту подключается внешний компьютер, используемый для записи результатов измерений и отладки прибора. В естественных условиях для выполнения данных функций применяется ноутбук повышенной прочности Getac A320 фирмы Mitac. Программное обеспечение реализовано на языке C++.

Выводы

Созданный прибор прошел сертификационные испытания и занесен в Государственный реестр средств измерения РФ. К настоящему времени он почти два года успешно эксплуатируется заказчиком в условиях Западной Сибири. Данные измерений объемов нефтяных загрязнений, полученные с помощью прибора КТС РМК-Н, передаются на АРМ эколога, входящее в состав районного центра управления системой экологического мониторинга для Ханты-Мансийского автономного округа. На рис. 3 в качестве примера приведена копия экрана компьютера АРМ эколога, на которой визуализированы результаты измерений разлива нефти в районе Лянторского месторождения.

Успехи в развитии как микроволновой, так и вычислительной техники позволяют провести дальнейшую модернизацию разработанного прибора, создать малогабаритный и высокоточный прибор, позволяющий контролировать широкий круг различных природных процессов и явлений. Основной вклад в эту работу вносят достижения в области создания малогабаритной вычислительной техники. Использование миниатюрных ЭВМ позволяет отказаться от длительного процесса разработки аналоговых цепей для детектирования, накопления, усреднения принимаемого сигнала. Основная задача разработчиков подобных приборов, таким образом, сводится к алгоритмизации физических процессов, оставляя практически все технические проблемы на долю производителей измерительной и вычислительной техники.

Опыт испытаний и эксплуатации прибора показал возможность расширения области его применения за счет создания весьма трудоемких алгоритмов определения параметров:

- земных покровов, в которых присутствует вода;
- любых диэлектрических (например, нефть, лед, снег) покрытий как на воде, так и на почве;
- пожаров, возгораний (как открытых, так и подповерхностных), задымлений;
- ветра и волн.

Очевидно, что это весьма трудоемкая и нетривиальная работа, но в общем случае возможно обнаружение и определение параметров любых областей возмущения диэлектрических свойств окружающей среды с пространственным разрешением, соответствующим длине волны, апертуре антенной системы и расстоянию до исследуемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный прибор наряду с описанным применением может быть использован и для решения многих других задач, связанных с измерениями в

СВЧ-диапазоне электромагнитных волн. Одна из основных проблем, возникающих при создании подобных устройств, состоит в правильном подборе компонентов вычислительной техники.

Авторы выражают благодарность сотрудникам нижегородского ООО НПП «Скада», оказавшим неоценимую помощь в выборе и приобретении аппаратных средств для реализации данного проекта. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. S.A.Pelyushenko. Microwave Radiometer System for the Detection of Oil Slicks// Spill Science and Technology Bulletin. — 1995. — Vol. 2. — No. 4.
2. Бирульчик В. П., Советкин М. Ю., Шавин П. Б., Чирков В. В. Использование метода поляризационной радиометрии для дистанционного измерения толщины пленки нефти// Труды XX всероссийской конференции «Распространение радиоволн». — Н. Новгород: Издательство Талам, 2002.

**Авторы — сотрудники
ФГУП «НПП „Полёт“»
Телефон: (8312) 42-9372**