

## АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ МЕТЕООБРАЗОВАНИЙ

Е. Н. Белов, О. А. Войтович, Т. А. Макулина, Г. А. Руднев, Г. И. Хлопов, С. И. Хоменко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [vojtovich@ire.kharkov.ua](mailto:vojtovich@ire.kharkov.ua)

Приведено описание аппаратно-программного комплекса для исследования параметров облачности и осадков, в который входят: двухчастотный радар, оптико-телевизионное устройство для визуального наблюдения исследуемых объектов, устройство калибровки радара для проведения абсолютных измерений радиолокационной отражаемости в динамическом диапазоне до 40 дБ, блок управления положением антенны, а также блок сопряжения с персональным компьютером. Разработанное программное обеспечение позволяет управлять работой радара и проводить измерения высотного профиля спектрально-корреляционных параметров для исследования характеристик турбулентности метеообразований. Ил. 13. Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.

**Ключевые слова:** метеообразования, радар, турбулентность, спектрально-корреляционная обработка.

Для обеспечения безопасности полетов авиации, навигации морских судов, защиты людей и объектов от стихийных бедствий, уменьшения потерь урожая и так далее широко используются радиолокационные методы определения параметров метеообразований и прогноза их дальнейшего развития [1, 2]. С этой целью в Украине была развернута сеть метеорологических радиолокаторов (МРЛ-1 – МРЛ-5), которые, к сожалению, морально и физически устарели. Разработка и создание более совершенных образцов МРЛ требует больших материальных затрат, поэтому значительный интерес представляют вопросы модернизации существующих радаров.

Используемые в настоящее время МРЛ обеспечивают измерение усредненных параметров радиолокационной отражаемости, в связи с чем основным резервом повышения их информативности является, в частности, измерение характеристик турбулентности [3], что требует модернизации радара. Настоящая работа посвящена описанию результатов разработки аппаратно-программного комплекса (АПК) на основе радара МРЛ-1 путем включения в его состав дополнительного цифрового оборудования для управления антенной, калибровки энергетического потенциала, расширения динамического диапазона приемного устройства и автоматической цифровой обработки принятых сигналов.

**1. Аппаратура комплекса.** Комплекс (рис. 1) состоит из:

- некогерентного двухчастотного радара МРЛ-1, работающего на длинах волн 8 мм и 3,2 см;
- блока управления антенной (БУА);
- оптико-телевизионного устройства (ОТВУ), предназначенного для визуального наблюдения исследуемых объектов;
- блока калибровки (БК) приемника радара;
- блока сопряжения (БС) радара с персональным компьютером (ПК);
- ПК, предназначенного для управления радаром и обработки отраженных сигналов.

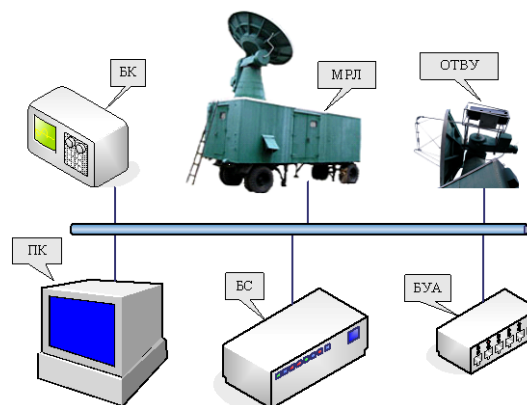


Рис. 1. Структурная схема АПК

Радар включает в себя приемопередающее устройство, блок управления и индикации, а также синхронно-следающий привод (ССП) для управления положением антенны.

Приемо-передающее устройство (рис. 2) состоит из двух идентичных каналов (8 мм и 3,2 см), которые используют одну зеркальную антенну диаметром 3,0 м, в фокусе которой расположены два рупорных облучателя с совмещенными фазовыми центрами. Для развязки частотных каналов используется дуплексер (ДП), который конструктивно совмещен с облучателями антенны и через вращающееся сочленение (ВС) волноводов подключен к встроенному измерителю проходящей мощности (ИМ<sub>1</sub>) магнетронного генератора (МГ). Для совместной работы приемопередатчика на общую антенну используются ферритовый циркулятор (ФЦ) и газовый разрядник (Р), который активизируется поджигающим импульсом (ПИ). К выходу разрядника подключен направленный ответвитель НО<sub>1</sub>, через боковое плечо которого вводится эталонный сигнал с выхода БК, а с прямого плеча принятый сигнал подается на маломощный усилитель (МШУ) на основе лампы бегущей волны.

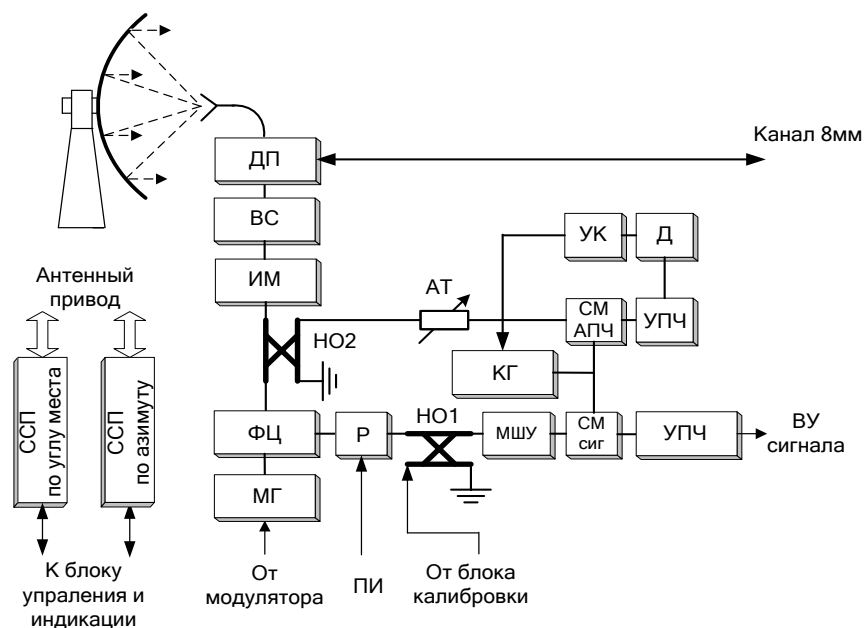


Рис. 2. Структурная схема прямо-передающего устройства радара

Направленный ответвитель  $HO_2$  и аттенуатор (АТ) обеспечивают работу системы автоматической подстройки частоты (АПЧ), а смесители каналов сигнала (СМ сиг) и АПЧ (СМ АПЧ) питаются от общего гетеродина на базе клистронного генератора (КГ), частота которого управляется с выхода канала АПЧ. Сигналы с выхода усилителя промежуточной частоты (УПЧ) сигнального канала подаются на вход видеоусилителя (ВУ), расположенного в блоке управления и индикации. Сигналы с выхода УПЧ канала АПЧ подаются на дискриминатор (Д), выход которого определяет режим работы управляющего каскада (УК) для контроля частоты клистронного генератора. При этом УПЧ сигнала работает в линейном или логарифмическом режимах, а УПЧ системы АПЧ – только в линейном режиме. Структурная схема канала 8 мм практически не отличается от описанной выше.

Управление положением антенны по азимуту и углу места осуществляется с помощью ССП. Для визуального наблюдения исследуемых метеорообъектов на механическом приводе антенны закреплено ОТВУ, оптическая ось которого совмещена с электрической осью антенны.

Выход ОТВУ подключен к телевизионным мониторам, которые установлены в кабине радара и рядом с ПК. На экранах мониторов формируется оптическое изображение метеорообъектов с высоким пространственным разрешением в режиме широкого (6 угл. град.) и узкого (1 угл. град.) поля зрения, что дает возможность координировать работу операторов ПК и радара при проведении измерений.

На рис. 3 приведена структурная схема блока управления и индикации, где сигналы с выхода видеоусилителей обоих каналов подаются на коммутатор каналов, который обеспечивает переключение индикаторов «дальность – высота» (ИДВ), «кругового обзора» (ИКО) и индикатора дальности (ИД), позволяя наблюдать сигналы, отраженные от метеорообъектов, отдельно по каждому из частотных каналов «3 см» и «8 мм» либо одновременно по обоим каналам.

При этом временная синхронизация работы всех устройств АПК, включая модулятор (М) магнетронного генератора, осуществляется от блока хронизатора (БХ), который в свою очередь запускается от БС.

БУА предназначен для сканирования лучом антенны в соответствии с режимом, который задает оператор ПК. В общем случае это требует существенного вмешательства в структуру штатного ССП радара, что далеко не всегда возможно в эксплуатационных условиях. Поэтому нами разработано электромеханическое устройство (рис. 4) для управления датчиками ССП, которые используются в режиме ручного управления положением антенны. В штатном режиме угловые положения осей датчиков по азимуту (ДАЗ) и углу места (ДУМ) в виде вращающихся трансформаторов задают положение антенны. Тот же эффект достигается при использовании шаговых двигателей (ШД), вращающих оси ДАЗ и ДУМ по командам с ПК при помощи безлюфтовой зубчатой передачи. При этом передаточное число выбирается из условия не хуже 0,1 угл. град. (с учетом характеристик ШД).

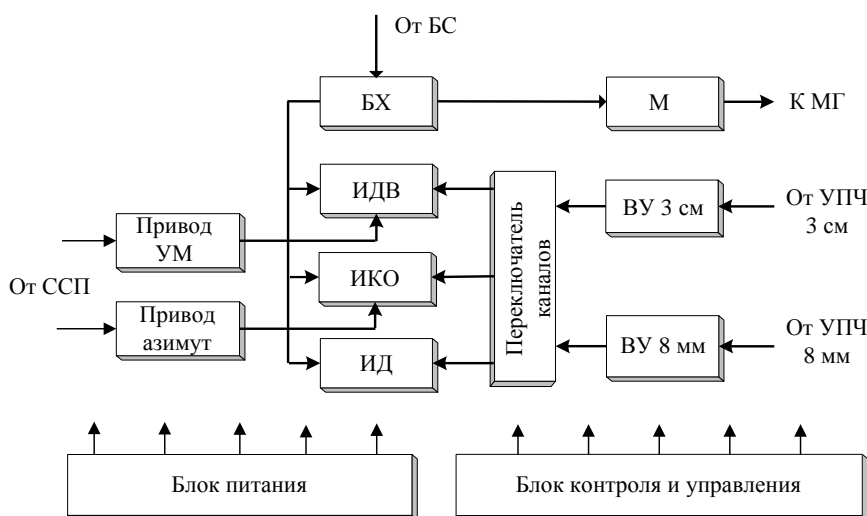


Рис. 3. Структура блока управления и индикации

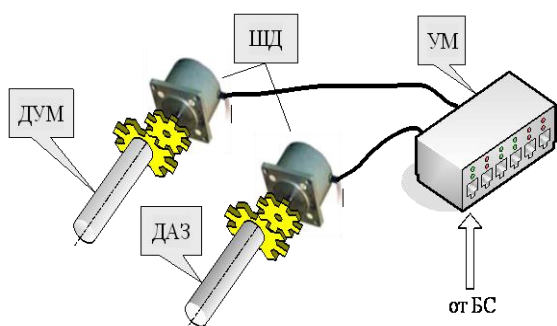


Рис. 4. Структура БУА

Управление двигателями осуществляется от усилителя мощности (УМ) на базе мощных транзисторных ключей, которые формируют импульсы тока в обмотках ШД, а управляющие сигналы формируются в модуле управления блока сопряжения (см. рис. 1). Модуль управления обеспечивает формирование управляющих сигналов по каналам азимута и угла места для каждого ШД и выполняет следующие функции:

- прием управляющих сигналов, поступающих по транзисторно-транзисторной логике (ТТЛ)-шине;
- формирование управляющих сигналов для транзисторных ключей;
- развязку между ТТЛ-шиной и остальным оборудованием с помощью оптрона.

Питание УМ осуществляется от отдельного источника постоянного напряжения 27 В, обеспечивающего ток нагрузки до 3 А.

Блок калибровки обеспечивает формирование импульсного СВЧ-сигнала эталонной мощности для калибровки энергетического потенциала радара и линеаризации амплитудной

характеристики его приемного устройства. Действительно, для прогнозирования характеристик метеообразований важным параметром является величина радиолокационной отражаемости [1]

$$Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \sigma, \text{ где } \lambda - \text{рабочая длина волны; } \sigma -$$

удельное значение эффективной площади рассеивания (ЭПР) исследуемого объекта. В соответствии с уравнением радиолокации для объемно распределенной цели [1, 2] исследование отражаемости требует проведения абсолютных измерений ЭПР, для чего необходимо знать не только излучаемую мощность и параметры антенны, но также и абсолютное значение принятой мощности. Вместе с тем для исследования характеристик турбулентности используются характеристики спектра флуктуаций отраженного сигнала (функции корреляции), что предъявляет повышенные требования к динамическому диапазону приемного устройства и его линейности. В штатном режиме существующие МРЛ обеспечивают весьма небольшой линейный участок амплитудной характеристики (< 25 дБ), как показано на рис. 5, а, где приведен типичный пример характеристики приемника МРЛ-1. Кроме того, в существующих МРЛ не предусмотрена калибровка чувствительности приемного устройства. Поэтому нами разработан и встроен в структуру МРЛ-1 блок калибровки (рис. 6), в котором непрерывный сигнал от клистронного генератора (КГ) через ферритовый вентиль (ФВ) поступает на волномер для контроля частоты КГ. Электрически управляемый  $p-i-n$ -выключатель ( $p-i-n$  Выкл) обеспечивает формирование СВЧ-импульсов длительностью  $\tau = 20$  мкс с помощью модулятора (МОД), запускаемого от БХ передатчика (см. рис. 3). Волноводный пере-

ключатель (ВП) подсоединяет импульсный сигнал СВЧ к боковому плечу НО<sub>1</sub> приемного устройства радара (см. рис. 2) через измерительный attenuator (АТИ) в режиме калибровки чувствительности. В режиме измерения мощности сигнал СВЧ подается на вход термисторного измерителя мощности (ИМ<sub>2</sub>).

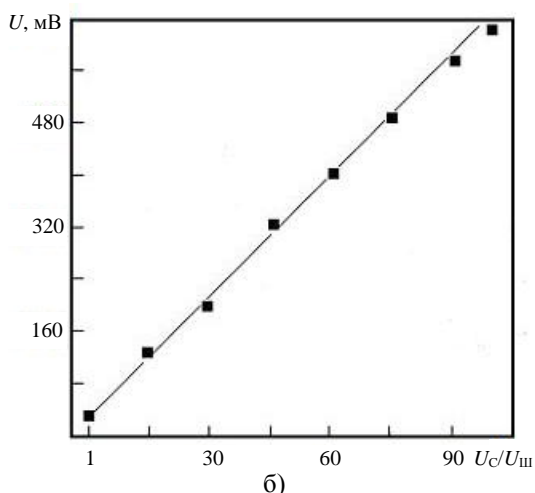
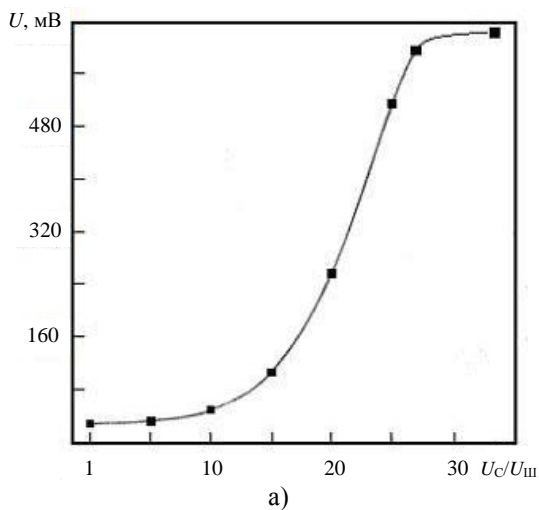


Рис. 5. Амплитудная характеристика приемного устройства МРЛ-1

Для линейризации амплитудной характеристики приемника его калибровка предполагает измерение выходного напряжения  $U_{\text{вых}} = A\{U_c\}$  с помощью АТИ (рис. 6) в зависимости от сигнала СВЧ  $U_c = \sqrt{P_c} = \sqrt{P_0 N_{\text{АТ}}}$  на входе направленного ответвителя НО<sub>1</sub> приемного устройства (рис. 2), где оператор  $A\{U_c\}$  описывает нелинейный характер амплитудной характеристики,  $P_0$  – мощность КГ (рис. 6) на входе измерительного attenuator,  $N_{\text{АТ}}$  – показания АТИ.

С помощью ПК вычисляется обратный оператор  $A^{-1}\{U_{\text{вых}}\}$  и строится линейризованная

зависимость  $U_c\{U_{\text{вых}}\}$ , которая затем используется при дальнейшей обработке сигналов в ПК. В частности, на рис. 5, б приведен пример линейризованной зависимости, которая отличается от линейной не более чем на  $\pm 0,5$  дБ в диапазоне  $\leq 45$  дБ, что позволяет говорить о реализации программно-аппаратурным методом линейного детектора с большим динамическим диапазоном.

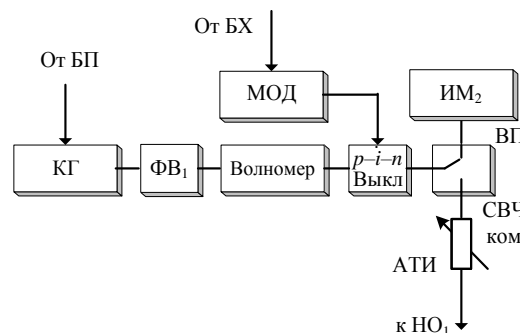


Рис. 6. Структурная схема БК

БС (рис. 7) предназначен для формирования импульсов запуска приемопередатчика радара, управления положением его антенны по азимуту и углу места, а также преобразования аналогового сигнала с выхода радара в цифровую форму с последующей передачей в ПК.

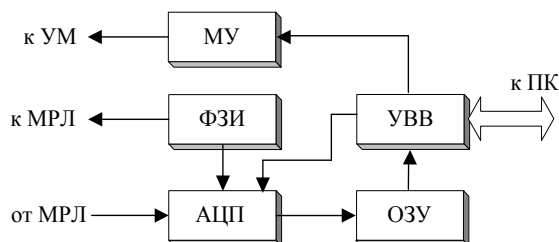


Рис. 7. Структурная схема БС

Устройство ввода-вывода (УВВ) осуществляет связь радара с ПК, управляя работой модуля управления (МУ) для формирования входных сигналов усилителя мощности УМ (см. рис. 4), питающего ШД, а также аналого-цифровым преобразователем (АЦП) для преобразования отраженных сигналов в цифровую форму. Устройство формирования запускающих импульсов (ФЗИ) обеспечивает временную синхронизацию всех подсистем, включая блок приемопередатчика, блок управления и индикации, а также систему обработки отраженных сигналов, причем штатное устройство запуска передатчика радара отключается. Оцифрованные отраженные сигналы с выхода АЦП накапливаются в оперативно-запоминающем устройстве (ОЗУ) для последующей передачи в ПК, где осуществляется обработка отраженных сигналов.

Завершая краткое описание аппаратуры АПК, приведем основные характеристики радара и системы обработки сигналов (табл. 1, 2).

Таблица 1  
Параметры радара

№	Параметр	Канал 3 см	Канал 8 мм
1	Импульсная мощность, кВт	250	50
2	Длительность импульса, мкс	1,0	0,5
3	Частота повторения, Гц	600	600
4	Предельная чувствительность, дБ/Вт	-132	-115
5	Полоса пропускания, МГц	1,0	2,0
6	Линейный динамический диапазон, дБ	45	45
7	Кoeffициент усиления антенны, дБ	48	59
8	Диаметр антенны, м	3,0	3,0
9	Уровень боковых лепестков, дБ	-21	-23
10	Ширина луча антенны по уровню -3 дБ, град	0,75	0,3
11	Энергетический потенциал, дБ	215	210

Таблица 2  
Параметры системы обработки сигналов

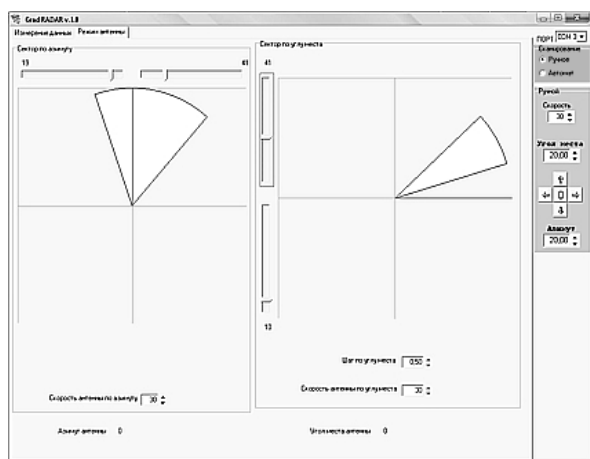
№	Параметр	Значение
1	Частота дискретизации, МГц	2,5
2	Количество отсчетов в одной ячейке дальности	4
3	Интерфейс связи с ПК	RS-232

**2. Программное обеспечение.** Для управления комплексом разработано программное обеспечение, которое позволяет производить измерение, запись и обработку отраженного сигнала. Программа условно состоит из трех частей, которые обеспечивают управление антенной по углу места и азимуту, отображение отраженных сигналов с выхода радара, их обработку.

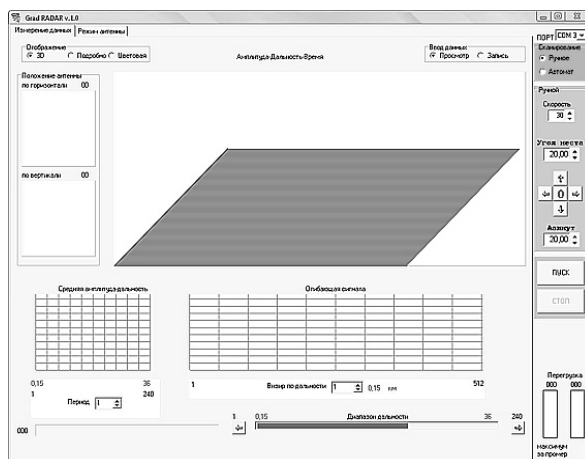
Управление положением антенны можно осуществлять как в ручном режиме, так и автоматически, задавая сектор и скорость сканирования по азимуту и по углу места (рис. 8, а, левая и правая часть экрана соответственно). Также предусмотрен режим сканирования по растру.

Для контроля временной структуры отраженных сигналов служит вторая часть программного обеспечения, где формируются три окна (рис. 8, б), отображающих следующую информацию:

- временную структуру отраженных сигналов за 512 периодов повторения зондирующих импульсов ( $T = 0,853$  с) в пределах 100 ячеек по дальности (15 км), положение которых выбирается оператором произвольно (верхнее окно, 3D изображение «время – амплитуда – дальность»);
- усредненную за 512 периодов повторения временную структуру отраженных сигналов по дальности «амплитуда – дальность» (левое нижнее окно);
- огибающую отраженных сигналов в пределах выбранной ячейки дальности за 512 периодов повторения «амплитуда – дальность» (правое нижнее окно).



а)



б)

Рис. 8. Экран монитора в режиме настройки сканирования антенной (а) и отображения временной структуры отраженных сигналов (б)

В частности, на рис. 9 приведен пример записи реальных сигналов 3-см канала, отраженных от осадков в виде дождя, при этом усредненная зависимость «амплитуда – дальность» (левое

нижнее окно) и текущая зависимость огибающей сигналов (правое нижнее окно) соответствуют временной зависимости «время – амплитуда – дальность» (верхнее окно). Для контроля процес-

са обработки отраженных сигналов служит третья часть программного обеспечения, которая позволяет вычислять спектр флуктуаций отраженного сигнала в каждой ячейке дальности (рис. 10, верхнее окно) и взаимную корреляцию отраженных сигналов в соседних ячейках дальности (рис. 11, верхнее окно). При этом, как и в случае окна временной структуры отраженных сигналов (рис. 9), нижние окна (рис. 10, 11) соответствуют участкам дальности, которые обозначены жирной линией. В качестве результата обработки отраженных сигналов используются высотные профили радиолокационной отражаемости и ширины спектра флуктуаций интенсивности

$$\Delta f(h) = \int_0^{\infty} df \bar{S}(h, f),$$

где  $\bar{S}(h, f)$  – нормированный спектр флуктуаций. Эти характеристики являются базовыми для получения метеорологической и гидрологической информации.

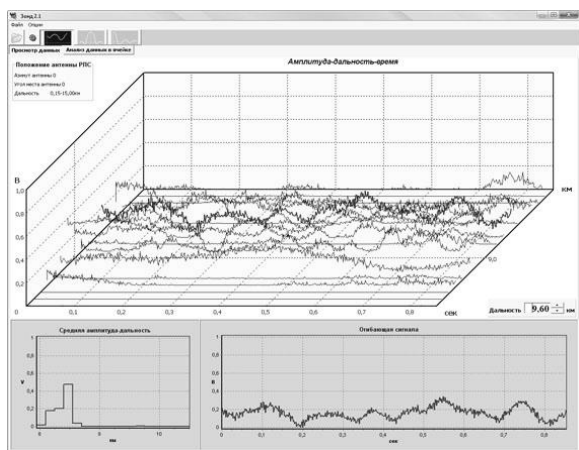


Рис. 9. Пример записи сигналов, отраженных от дождя

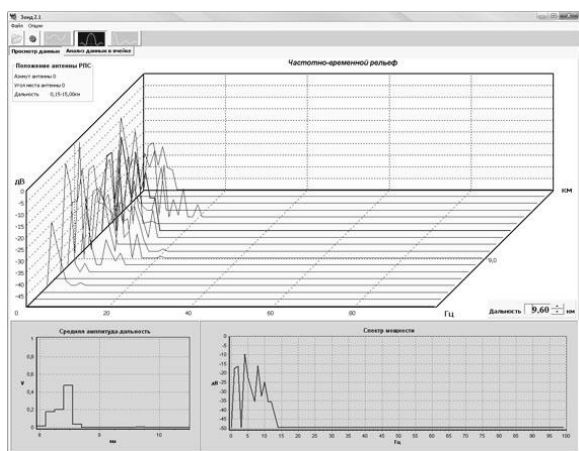


Рис. 10. Окно спектральной обработки сигналов

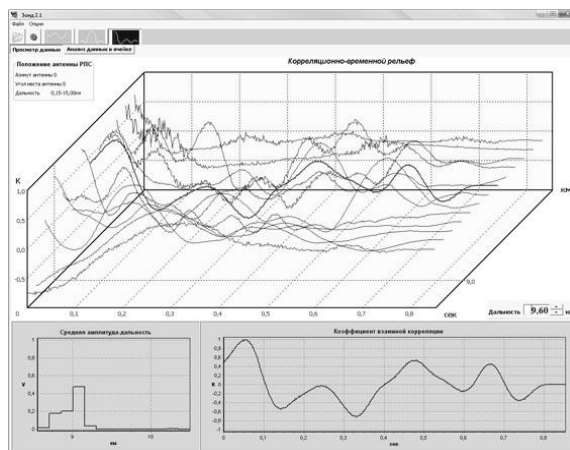


Рис. 11. Окно взаимно-корреляционной обработки сигналов

Так, на рис. 12 приведен пример вертикального профиля отражаемости, измеренной с помощью вертикального сканирования осадков в виде дождя в летнее время (интенсивность  $\approx 2$  мм/час, скорость ветра  $\bar{V} \leq 1,5$  м/с), который характерен для слоисто-дождевых облаков и обложных осадков [2].

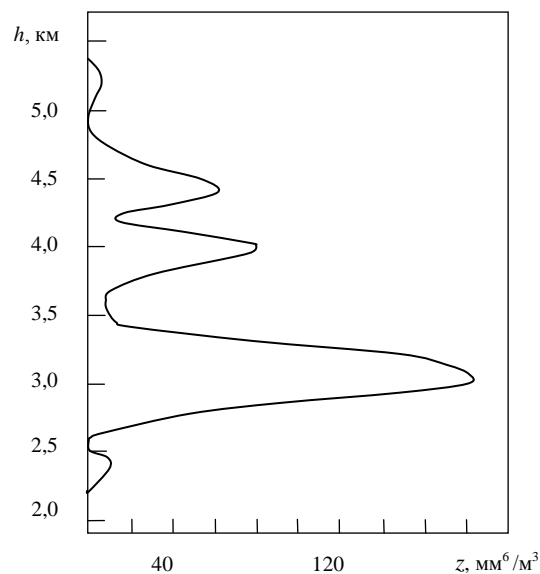


Рис. 12. Профиль отражаемости для дождя

На рис. 13 приведен пример высотного профиля ширины спектра  $\Delta f(h)$ . При этом необходимо отметить, что области повышенной турбулентности ( $h \approx 5$  км) и отражаемости ( $h \approx 3$  км) не совпадают, что позволяет предположить независимость указанных характеристик и может быть использовано для распознавания метеорологических объектов.

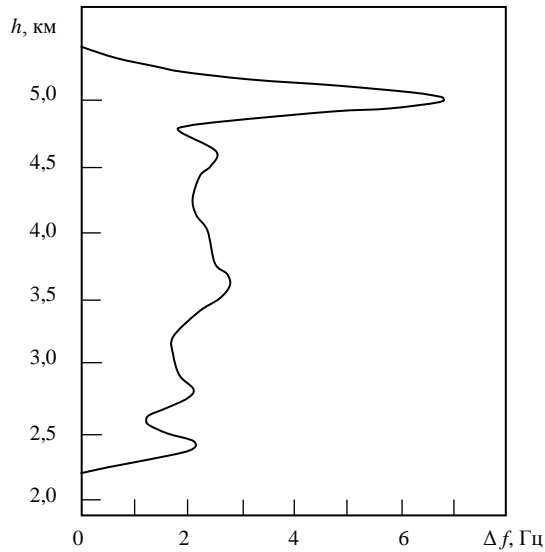


Рис. 13. Профиль ширины спектра интенсивности флуктуаций сигналов от дождя

**Выводы.** Таким образом, описанный опыт модернизации метеорологического радара и разработки программного обеспечения позволяет увеличить информативность радиолокационного зондирования метеорологических объектов, в том числе:

- расширить квадратичный участок динамического диапазона принимаемых сигналов до 45 дБ;
- обеспечить калибровку приемного устройства для измерения абсолютных значений радиолокационной отражаемости;
- обеспечить программируемый режим обзора пространства с заданной скоростью, включая сканирование в произвольном секторе по азимуту, углу места или по растру;
- обеспечить вычисление профиля радиолокационной отражаемости, ширины спектра флуктуаций интенсивности и взаимной корреляции отраженных сигналов, что позволяет судить о параметрах турбулентности атмосферных образований.

1. *Атлас Д.* Успехи радарной метеорологии / Пер. с англ. под ред. К. С. Шифрина. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 194 с.
2. *Брылев Г. Б., Гашина С. Б., Низдойминова Г. Л.* Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 231 с.
3. *Батан Р.* Радиолокационная метеорология. – Л.: Гидрометеоздат, 1962. – 284 с.

#### INSTRUMENTAL-PROGRAM SYSTEM FOR STUDY OF METEOROLOGICAL RADAR ECHO

E. N. Belov, O. A. Vojtovich, T. A. Makulina,  
G. A. Rudnev, G. I. Khlopov, S. I. Khomenko

The description of instrumental-program system for study of clouds and precipitation is described. The system includes double-frequency radar, optical-television device for visual observation of the objects under inspection, calibration device to provide absolute measurements of radar reflectivity in the dynamic range up to 40 dB, control unit for the antenna orientation and interface unit for coupling radar to a personal computer. The software developed permits to control the radar and provide measurements of altitude profile of spectral-correlation parameters for study of turbulence characteristics of meteorological objects.

**Key words:** meteorological object, radar, turbulence, spectral-correlation processing.

#### АПАРАТУРНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВІДБИТТІВ ВІД МЕТЕОУТВОРЕНЬ

Є. М. Белов, О. А. Войтович, Т. О. Макуліна,  
Г. О. Руднєв, Г. І. Хлопов, С. І. Хоменко

Приведено опис апаратно-програмного комплексу для дослідження параметрів хмарності та осадів, до якого входять: двохчастотний радар, оптико-телевізійний пристрій для візуального спостереження метеоутворень, пристрій калібрування радара для проведення абсолютних вимірювань радіолокаційних відбиттів у динамічному діапазоні до 40 дБ, блок управління положенням антени, а також блок спряження з комп'ютером. Розроблене програмне забезпечення дозволяє керувати роботою радара та проводити вимірювання висотно-го профілю спектрально-кореляційних параметрів для дослідження характеристик турбулентності метеоутворень.

**Ключові слова:** метеоутворення, радар, турбулентність, спектрально-кореляційна обробка.

Рукопись поступила 14 января 2009 г.