



УДК 551.501.815.
DOI 10.21685/2587-7704-2017-2-1-3



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Допплеровский метеорадиолокатор

А. В. Белов

Пензенский государственный университет, Россия, 440026 г. Пенза, ул. Красная, 40

В. М. Чайковский

Пензенский государственный университет, Россия, 440026 г. Пенза, ул. Красная, 40

Аннотация. Рассмотрен доплеровский метеорадиолокатор, осуществляющий как оценку дальности до метеообразования, так и распознавание его характера по критерию отражаемости.

Ключевые слова: метеорадиолокатор, эффект Доплера, метеообразование, радиальная скорость, фазовый детектор, критерий, отражаемость.

Doppler meteorological radar

A. V. Belov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, 440026, Penza, Russia

V. M. Chaykovsky

Penza State University, 40 Krasnaya Street, 440026, Penza, Russia

Abstract. The paper deals with Doppler meteorological radar, which both estimates the range to the moisture target and recognises its character by the criterion of reflectivity.

Key words: meteorological radar, Doppler effect, moisture target, radial velocity, phase detector, criterion, reflectivity.

В настоящее время практическое использование получаемой тем или иным способом метеорологической информации выделяется в целый ряд прикладных направлений метеорологии, одним из которых, причем наиболее важнейшим, является синоптическое.

Сложно переоценить практическое значение знаний о причинах возникновения различных атмосферных явлений, а также умение не только предсказывать появление этих явлений, но и уметь своевременно давать предупреждение о приближении тех или иных опасных метеообразований (МО), представляющих угрозу привычному ходу жизнедеятельности человека.

Использование эффекта Доплера в МРЛ позволяет существенно повысить достоверность своевременного обнаружения приближающегося шквала, смерча, града и точно спрогнозировать присутствующее им количество осадков.

Суть предлагаемого устройства заключается в том, что в основе его работы лежит использование данного эффекта, проявляющегося на двух разнесенных по значению частотах зондирующего сигнала, представляющего собой высокочастотное гармоническое колебание с фиксированным значением частоты. Данный прием позволяет выявить за счет проведения последующей операции усреднения результатов измерения радиальной скорости между измерениями на каждом значении частоты повторение зондирующего сигнала, что, несомненно, позволяет более точно оценить значение радиальной скорости перемещения обнаруженного МО, а также значение расстояния до него. Причем последнее достигается путем оценки разности фаз, образующейся между доплеровскими приращениями, возникающими соответственно на каждой из используемых частот повторения зондирующего сигнала. Последнее позволяет резко увеличить скорость получения более достоверной метеорологической информации.

Практика исследований показывает [1], что рабочие частоты зондирующего сигнала должны находиться в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн, что соответствует С-диапазону. Согласно классификации IEEE этот диапазон простирается от 4 до 8 ГГц электромагнитного спектра (длины волн от 7,5 до 3,75 см). Использование зондирующего сигнала именно в этом диапазоне позволяет учитывать специфическую особенность отражаемости МО [2].

Структурная схема предлагаемого метеорологического радиолокатора, изображена на рис. 1.

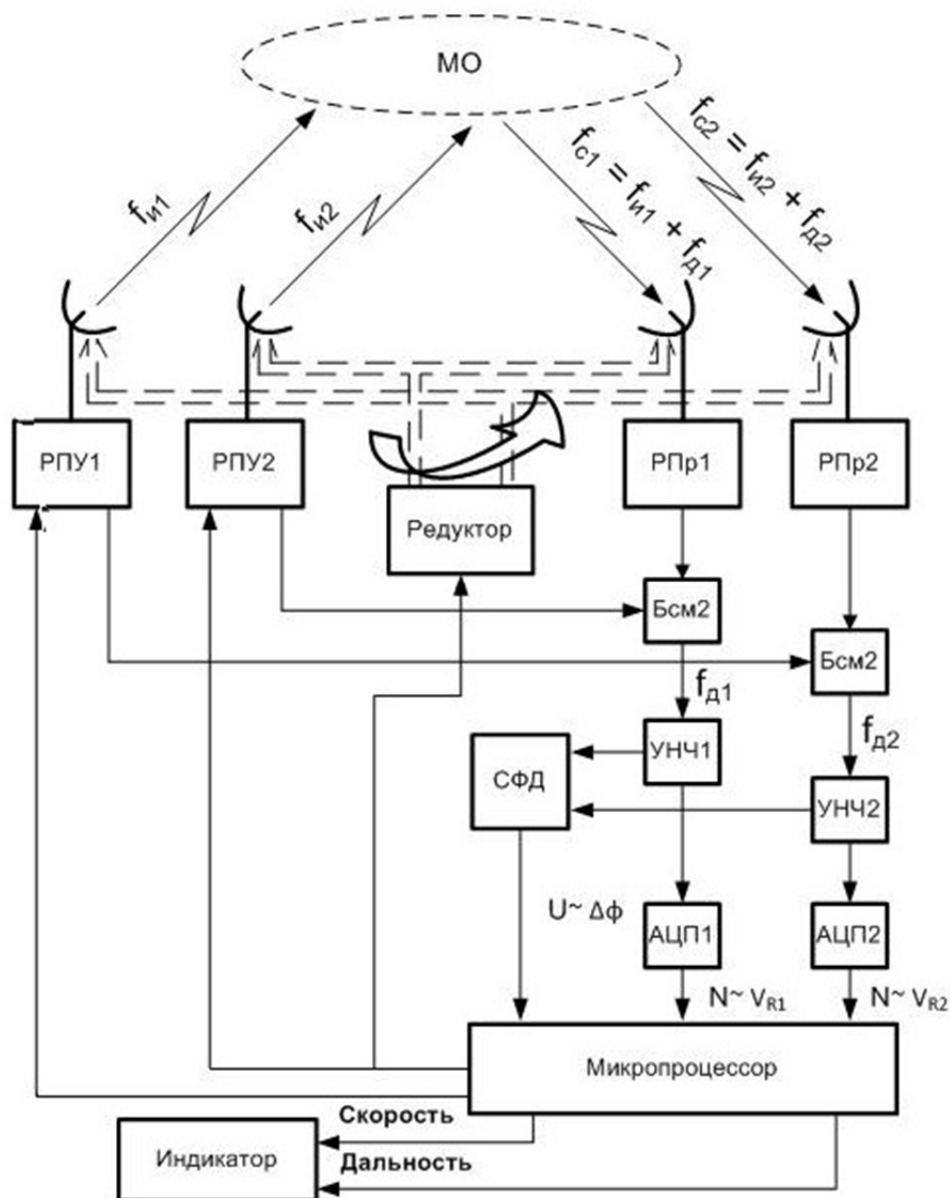


Рис. 1

По команде микропроцессора (МП) передатчики РПУ₁ и РПУ₂, в состав которых входят опорные генератора гармонических колебаний с фиксированными значениями частот, соответственно $f_{и1} = 5500$ МГц и $f_{и2} = 6000$ МГц, вырабатывают зондирующие сигналы, поступающие на соответствующие излучатели передающих антенн А₁ и А₂, которые формируют лучи, направленные в сторону МО.

Частоты зондирующих сигналов, отраженных от МО, будут равны значениям частот излучения с соответствующими доплеровскими приращениями

$$f_{с1} = f_{и1} + f_{д1} \text{ и } f_{с2} = f_{и2} + f_{д2} .$$

Далее эти сигналы, принимаемые соответствующими приемными антеннами А₃ и А₄, поступают на первые входы балансных смесителей Бсм₁, Бсм₂ [3], на вторые входы которых поступают

в качестве опорных сигналы от генераторов высокочастотных колебаний, входящих в состав РПУ₁ и РПУ₂.

На выходах Бсм₁ и Бсм₂ выделяются низкочастотные колебания доплеровских приращений частот соответственно $f_{Д1}$ и $f_{Д2}$, амплитуды которых после усиления их соответствующими УНЧ₁ и УНЧ₂ с доведением их до нормированного уровня в 1В сразу преобразуются АЦП в цифровой сигнал в виде кодовых комбинаций N_1 и N_2 и подаются на МП, таким образом осуществляется преобразование значений величин $f_{Д1}$ и $f_{Д2}$ в соответствующие коды.

В самом МП [4] происходит определение значения радиальной скорости МО на каждом из значений частот зондирующего сигнала, затем осуществляется усреднение этих значений и полученное при этом значение скорости МО V_R окончательно выводится на индикатор.

Каждая передающая антенна A_1 и A_2 располагается в непосредственной близости от приемных A_3 и A_4 и соответствующих приемников РПр₁ и РПр₂, что облегчает работу соответствующих балансных смесителей Бсм₁ и Бсм₂.

При этом значение радиальной скорости V_R МО будет определяться путем оценки значения доплеровского смещения частоты f_d [3], $V_R = \lambda_n f_d / 2$, причем проводится это будет дважды, соответственно на $f_{И1}$ и $f_{И2}$, в результате чего будут получены значения V_{R1} и V_{R2} .

Данные значения получаются в результате операции масштабирования, выполняемой МП, значений частот $f_{Д1}$ и $f_{Д2}$ на половину длины волны зондирующего сигнала, равняющегося 0,027 м для частоты зондирующего сигнала 5500 МГц и 0,025 м, соответственно, для 6000 МГц.

Далее окончательное значение радиальной скорости МО V_R находится посредством усреднения полученных значений V_{R1} и V_{R2} :

$$V_R = \frac{V_{R1} + V_{R2}}{2}.$$

Измерение дальности до МО основывается на том положении, что фаза отраженного сигнала зависит от пройденного им расстояния [3].

Так как формируемые РПУ₁ и РПУ₂ зондирующие сигналы, изменяющиеся по синусоидальному закону и имеющие нулевую начальную фазу, будут в общем виде выглядеть как $u = U \sin \omega t$, напряжения каждого из отраженных сигналов, имеющих свое значение частоты зондирующего сигнала, на выходах приемников будут описываться также в общем виде: $u = U \sin \omega(t - t_3)$, а $t_3 = 2D / C$, где t_3 – время распространения зондирующего сигнала до МО и обратно, D – расстояние до МО, C – скорость распространения зондирующего сигнала.

После соответствующих преобразований получается, что фазы каждого отраженного сигнала соответственно будут равны

$$\varphi_1 = \frac{4\pi D}{C - V_R} f_{И1} \text{ и } \varphi_2 = \frac{4\pi D}{C - V_R} f_{И2},$$

при этом разность $\Delta\varphi$ между φ_1 и φ_2 , с учетом того, что $C \gg V_R$, будет равна

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi \Delta f D}{C},$$

из данного выражения следует, что

$$D = \frac{C}{4\pi \Delta f} \Delta\varphi, \quad (1)$$

где Δf – разность между частотами зондирующих сигналов $f_{И1}$ и $f_{И2}$, $\Delta\varphi$ – это разность фаз между доплеровскими приращениями частот $f_{Д1}$ и $f_{Д2}$

Очевидно, что здесь используется метод доплеровского измерения расстояния до движущегося объекта на двух разнесенных по значению, фиксированных частотах зондирующего высокочастотного гармонического сигнала [3].

Оба значения соответствующих доплеровских приращений частоты, каждое из которых имеет свое значение фазы, поступают на входы специального фазового детектора (СФД), с выхода которого напряжение, пропорциональное $\Delta\varphi$, поступает на соответствующий вход МП, в котором окончательно определяется значение дальности до МО.

Методика определения дальности до МО частично аналогичная определению радиальной скорости МО, т.е. процедура определения дальности сводится к операции умножения получаемого значения разности фаз $\Delta\varphi$ между сигналами $f_{Д1}$ и $f_{Д2}$ на соответствующий коэффициент K_D , значение

которого, определяемое согласно выражению (1), будет равно 0,048 м/рад, при этом полученное значение дальности до МО также выводится на индикатор.

Необходимость в наличии специального фазового детектора вызвана тем, что суть используемого в МРЛС метода измерения расстояния до МО основывается на оценке разности фаз между доплеровскими приращениями частот $f_{д1}$ и $f_{д2}$ будут иметь разные абсолютные значения, то для измерения значения $\Delta\varphi$ между ними необходимо добиться равенства значений этих частот. Последнее может быть достигнуто путем гетеродинного преобразования сигналов $Uf_{д1}$ и $Uf_{д2}$ с автоматическим изменением частоты гетеродина (АИЧГ), сводящегося к последующему переносу их частотного спектра в область нижних частот, а именно, приведение их значения частоты, равным 1500 Гц, в дальнейшем обозначаемым как $f_{п}$. Согласно [5] при организации подобных частотных преобразований с сигналом значение его фазы сохраняется неизменным.

Выбор указанного значения $f_{п}$ обусловлен тем, что проведенный анализ изменения значения доплеровских приращений показал, что при достижении радиальной скорости перемещения МО 100 м/с, что встречается в исключительных случаях, значение доплеровских приращений частоты не превышает 2 кГц.

Практика схемотехнических решений, обеспечивающих подобные преобразования, хорошо отработана к настоящему времени [6]. Структурная схема организации преобразования АИЧГ приведена на рис. 2, в которой предварительно выделенные и усиленные сигналы $Uf_{д1}$ и $Uf_{д2}$ подаются на вход смесителя СМ1 и СМ2 соответственно, где они взаимодействуют с сигналами $Uf_{г1}$ и $Uf_{г2}$, формируемыми управляемыми генераторами (УГ1, УГ2), в результате чего на выходе системы преобразования выделяются сигналы с фиксированным, равным 1500 Гц, значением частоты $U^1f_{д1}$ и $U^1f_{д2}$. Эти сигналы поступают на входы усилителей (У1, У2), которые усиливают выходной сигнал СМ1 и СМ2 с доведением уровня их амплитуд до значения, обеспечивающего устойчивую работу частотных дискриминаторов (ЧД1, ЧД2). Последние путем сравнения значения частоты выходных напряжений СМ1 и СМ2 с требуемым значением 1500 Гц формируют управляющие напряжения $U_{упр д1}$ и $U_{упр д2}$, значения и знаки которых будут определяться степенью и направлением отклонения значений частот данных напряжений от значения 1500 Гц.

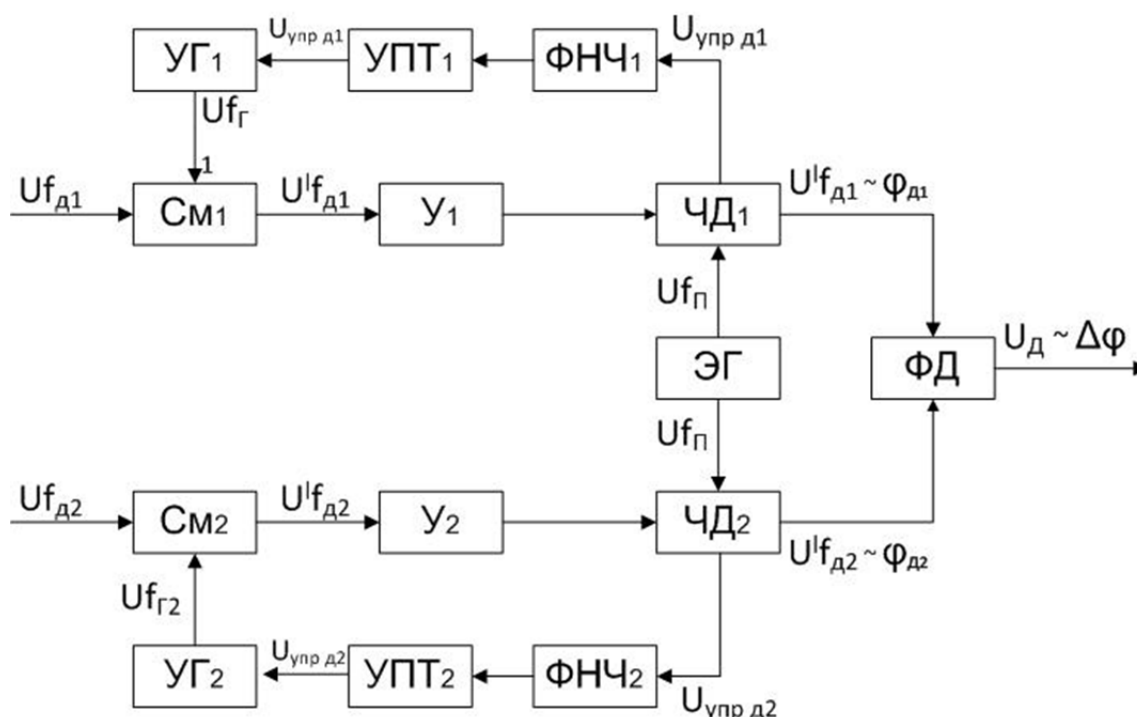


Рис. 2

Введение в контур цепи автоматического изменения частоты генераторов Г1 и Г2 фильтров нижних частот, соответственно ФНЧ1 и ФНЧ2, необходимо для придания астатизма данным системам, т.е. чтобы не происходила потеря устойчивости последними. Сформированные ЧД1 и ЧД2 и усиленные до требуемого значения усилителями постоянного тока, соответственно УПТ1 и УПТ2, управляющие напряжения $U_{упр д1}$ и $U_{упр д2}$ действуют на варикапы, входящие в состав Г1 и Г2, тем

самым изменяя значение частоты вырабатываемых последними напряжений таким образом, чтобы частоты выходных напряжений ЧД1 и ЧД2 стали одинаковыми и равными 1500 Гц. Затем напряжения $U^1 f_{д1}$ и $U^1 f_{д2}$ поступают соответственно на первый и второй входы ФД, реализованного по традиционной схеме [7], на выходе которого формируется напряжение постоянного тока, амплитуда которого определяется разностью фаз сигналов доплеровских приращений частоты разнесенных по частоте зондирующих сигналов МРЛС.

Для проведения идентификации МО необходимо учесть краткую характеристику кучево-дождевых облаков, данную в соответствии с классификацией, принятой Всемирной метеорологической организацией [8], в которой выделяются три типа очагов интенсивной конвекции капель с основными отличительными признаками (табл. 1).

Таблица 1

Параметр	Одноячейковые	Многоячейковые	Суперячейковые
Продолжительность существования, ч	До 1	До 1,5	До 4
Высота верхней границы, км	8–12	10–14	12–16
Размер поперечного сечения, км	5–20	20–40	20–40
Метеоявления	Ливни, грозы, град	Сильные ливни, грозы, град	Катастрофические ливни, град, торнадо, сдвиг ветра
Синоптическая ситуация	Малогradientное барическое поле	Холодные фронты (основные и вторичные)	Холодный фронт, фронт окклюзии

Использование в качестве критериев распознавания отдельных радиолокационных признаков, как правило, не дает достаточной гарантии распознавания наблюдаемых МО [8]. Поэтому проведение объективного метеорологического анализа первичных радиолокационных данных основывается на использовании нескольких радиолокационных признаков, объединенных сетью критериев.

В предлагаемом МРЛ по определенному критерию будут оцениваться радиолокационные признаки с присущими им наиболее устойчивыми статистическими связями, существующими между формами МО и их радиолокационными характеристиками, такими как:

- геометрические размеры радиолокационного изображения и его пространственное распределение;

- значение радиолокационной отражаемости и изменения ее по высоте.

Спектр частиц, определяющих водность и интенсивность осадков будет определять и средний диаметр объема МО. Поэтому для идентификации последнего требуется определить отражаемость и ослабление принятого сигнала, вызываемого самим МО. Для чего требуется знать характер распределения данных частиц, образующих МО, по размерам и по их связи с физическими характеристиками самого МО и вызываемыми ими осадками [8].

Обнаруженные МО на индикаторе кругового обзора МРЛ будут иметь различный характер яркостного изображения. Однако накопленная статистика практической метеолокации дает возможность выделения на индикаторе нескольких характерных типов изображения [9]. Грозовые и ливневые очаги в кучево-дождевых облаках имеют наиболее яркие изображения в виде пятен неправильной формы (часто овальной) с четко выраженными краями. Если эти пятна беспорядочно разбросаны по площади экрана индикатора, то грозы и ливни являются внутримассовыми. Если же они вытянуты в виде одной, двух или трех цепочек, то грозы и ливни будут вызваны атмосферными фронтами. Слоисто-дождевые, а также высокослоистые облака дают на центральной части экрана индикатора большое светлое пятно неправильной формы с сильно размытыми краями [9].

Основными радиолокационными признаками кучевообразных облаков и явлений, связанных с ними, являются:

- максимальная высота верхней границы радиоэха (H_{max});

- значение отражаемости (Z);

- вертикальный профиль отражаемости (ν), т.е. распределение по высоте.

Облака разных форм различаются по вертикальному профилю отражаемости. В слоисто-дождевых облаках отражаемость от нижней границы облаков возрастает до уровня нулевой изотермы, где достигает максимального значения, а затем уменьшается с высотой. В кучево-дождевых облаках интенсивность радиоэха незначительно изменяется с высотой. Максимальное значение отража-

емости определяется высотой расположения ядра наиболее крупных частиц, образующих МО [9]. Высота этого уровня зависит от интенсивности вертикальных движений в облаке, т.е. от стадии его развития. В грозовых облаках Z_{\max} располагается обычно выше, чем в ливневых облаках. При выпадении осадков радиоэхо опускается до земной поверхности.

В табл. 2 приведены среднестатистические радиолокационные значения, присущие различным метеообразованиям [8].

Таблица 2

Вид явлений	H , км	$\lg Z_{\max}$	y , км ⁻¹
Гроза	7,7	4,5	0,45
Ливень	5,0	3,3	0,94
Обложные осадки	4,0	2,3	2,30

Через y обозначен вертикальный градиент логарифма отражаемости.

Из таблицы видно, что грозовые очаги имеют наибольшую высоту, наибольшую отражаемость и наименьшее значение вертикального градиента логарифма отражаемости, именно оценка всех трех радиолокационных признаков обеспечивает адекватную оценку реальному идентифицированию МО.

Для опознавания кучево-дождевых облаков и явлений, связанных с ними, применим комплексный обобщенный критерий [9]:

Для однозначности опознавания кучево-дождевых облаков и опасных МО, кроме получаемых радиолокационных характеристик, необходимо использовать дополнительную аэрологическую информацию, такую как высота изотермы, свидетельствующую об уровне начала массовой кристаллизации облачных элементов ($-22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для образования грозового кучево-дождевого облака [9] необходимо, чтобы его верхняя часть развивалась выше уровня изотермы. При радиолокационных наблюдениях МО вертикального развития и связанных с ними явлениями МРЛ будет подразделять МО на три группы и выводить свой прогноз на экран индикатора со сводкой всех данных, необходимых для оператора, таких как [9]:

I – грозоопасные кучево-дождевые облака и грозовые облака с градом;

II – грозоопасные кучево-дождевые облака и ливневый дождь с грозой;

III – кучево-дождевые облака с ливнем и мощные кучевые облака.

Облака вертикального развития будут сопровождаться грозой и градом, если: $\lg Z_3 \geq 4,5$; комплексный критерий $y \geq 40$; высота радиоэха равна высоте тропопаузы или превышает ее при $\lg Z_3 \geq 3,5$.

Для распознавания грозоопасных кучево-дождевых облаков и ливневого дождя с грозой традиционно используются следующие критерии [5]:

1) в теплое время года:

а) $\lg Z_2 \geq 3,5$; $\lg Z_3 \geq 3,0$ при высоте радиоэха более 2–2,5 км над уровнем нулевой изотермы; вероятность грозы более 90 %;

б) $10 \leq y \leq 20$ – вероятность грозы менее 70 %; $20 \leq y \leq 25$ – вероятность грозы 75–80 %; $y > 25$ – вероятность грозы более 90 %;

2) в холодное время года: $\lg Z_3 > (2 - 2,5)$ при четко выраженном радиоэхе кучевообразных облаков (РКО) на высоте более 4–6 км.

Для опознавания кучево-дождевых облаков с ливнями и мощных кучевых облаков критериями являются:

1) в теплое время года:

а) $6 \leq y < 10$, ливневые осадки с вероятностью 70–90 %;

б) $\lg Z_1 \geq 0$ (при $6 \leq y < 10$); вероятность ливневых осадков в радиусе до 90 км составляет 90–95 %.

При наличии нижней границы РКО, $\lg Z_1 < 0$, $y < 6$ фиксируются кучевообразные облака без метеоявлений;

2) в холодное время года:

а) при $\lg Z_1 \geq 1,3$ фиксируется ливневый снег в радиусе до 90 км с вероятностью более 90 %;

б) при $0,7 \leq \lg Z_1 \leq 1,3$ фиксируется ливневый снег с вероятностью 30–70 %;

в) при $-0,3 \leq \lg Z_1 \leq 0,7$ фиксируется обложной снег в радиусе до 90 км.

Анализ метеобстановки по данным радиолокационных наблюдений будет полнее, если в МРЛ имеются в распоряжении диспетчера, производящие дополнительную идентификацию по статистическим изображениям радиоэха и контролирующие параметры идентификации МРЛ во избежание ошибки, вызванной флуктуацией скорости в МО [10].

Идентификация МО в предлагаемом МРЛ [1] должна осуществляться в строгом соответствии с алгоритмом (рис. 3).

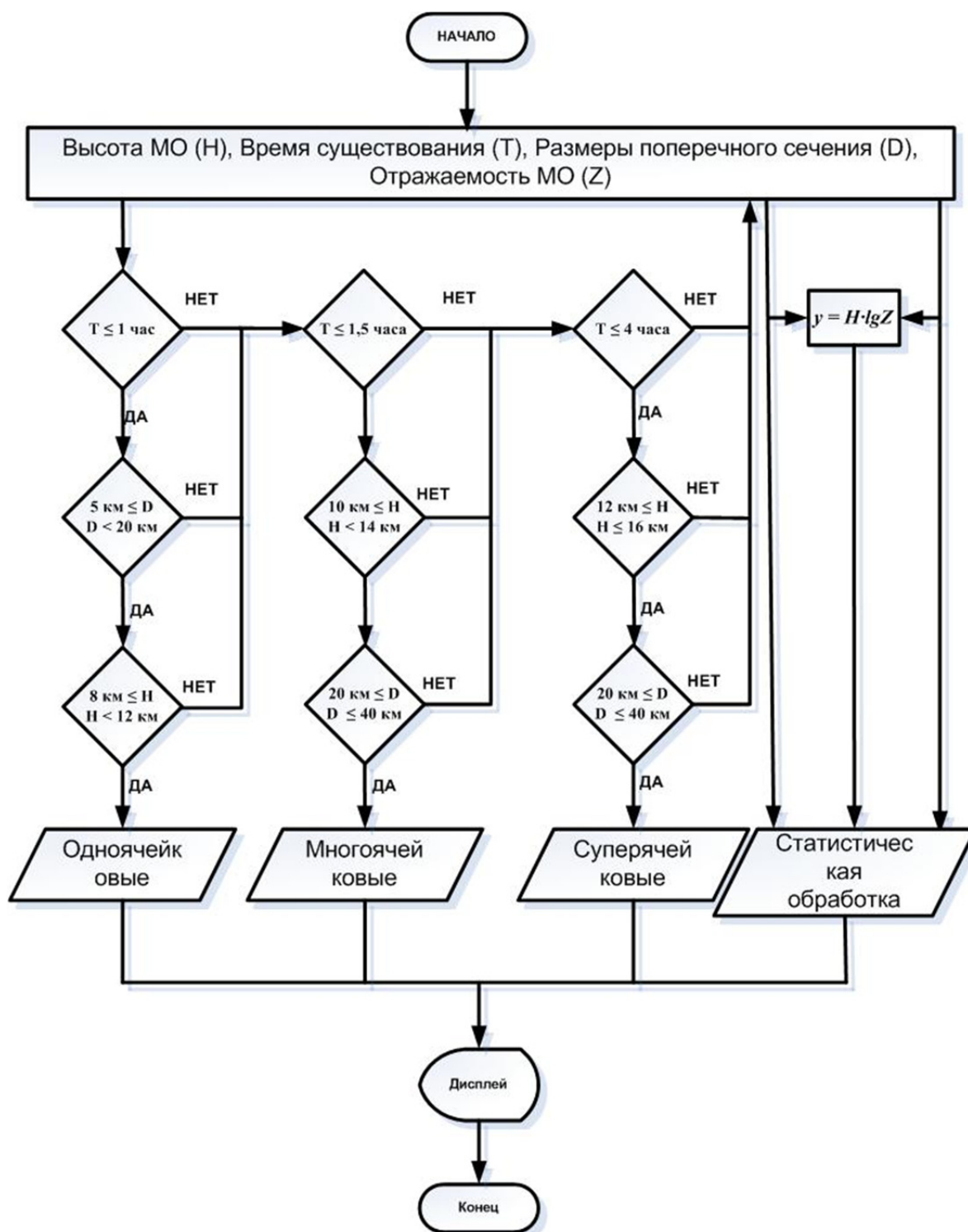


Рис. 3

В данном алгоритме отражена последовательность анализа параметров идентификации МО, состоящая из двух параллельных этапов классификации, первый определяет тип метеообразования по очагам конвекции капель, а второй формирует статистическую обработку, в которой будут производиться вычисления и идентификация МО на основе радиолокационных данных, таких как максимальная высота верхней границы радиоэха (H_{\max}), значение отражаемости (Z), вертикальный профиль отражаемости (y) и выводы, сделанные по данному алгоритму, будут отображены на дисплее, сопоставляя которые с распределением единичных отражателей в объекте (т.е. засветка) на дисплее, дис-

петчер делает выводы о характере атмосферного явления. Идентификация обнаруженного МО основана на сопоставлении значения ряда измеренных МРЛ его величин с пороговыми значениями аналогичных величин, полученных статистическим путем, которые предварительно были занесены в память микропроцессора. Данная операция выполняется логическими элементами с использованием обратных связей. Последнее выполняется с помощью программируемого микроконтроллера на базе CompactRIO и Single-BoardRIO [11].

Библиографический список

1. Белов, А. В. Метеорологический доплеровский радиолокатор / А. В. Белов, В. С. Мещеряков, В. М. Чайковский // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 53–55.
2. Радиолокационные измерения осадков / под ред. А. М. Боровикова. – Л., 1967.
3. Радиотехнические системы / под ред. проф. Ю. М. Казаринова. – М. : Высш. шк., 1990.
4. Шонфелдер, Г. Измерительные устройства на базе микропроцессора Atmega / Г. Шонфелдер, К. Шнайдер. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 288 с.
5. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский, М. П. Демин. – М. : Радио и связь, 1994.
6. Гаврилов, С. А. Искусство схемотехники. Просто о сложном / С. А. Гаврилов. – СПб. : Наука и техника, 2011. – 352 с.
7. Коновалов, Г. Ф. Радиоавтоматика / Г. Ф. Коновалов. – М. : Высш. шк., 1990.
8. Справочник по радиолокации. Кн. 2 / под ред. М. И. Сколника. – М., 2014.
9. Калинин, Н. А. Возможности метеорологических радиолокаторов в обнаружении облачности и опасных явлений погоды / Н. А. Калинин, А. А. Смирнова // Географический вестник. – 2006. – № 2. – С. 76–83.
10. Якимов, А. Н. Обеспечение помехоустойчивости информационных коммуникаций в интеллектуальной радиолокационной системе / А. Н. Якимов, В. Б. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1. – С. 124–132.
11. Платформы CompactRIO и Single-Board RIO. National Instruments, 2015.

Белов, А. В.

Доплеровский метеорадиолокатор / А. В. Белов, В. М. Чайковский // Инжиниринг и технологии. – 2017. – Vol. 2(1). – DOI 10.21685/2587-7704-2017-2-1-3