

УДК 551.508.85

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РАДАР

КОРБАН В.Х., КОРБАН Д.В., ДЕГТЯРЁВА Л.Н.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
ул. Кузнечная, 1, Одесса, 65029, Украина
l.demenko@ukr.net*

БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ МЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ РАДАР

КОРБАН В.Х., КОРБАН Д.В., ДЕГТЯРЬОВА Л.М.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
вул. Кузнечна, 1, Одеса, 65029, Україна
l.demenko@ukr.net*

MULTIFUNCTIONAL WEATHER RADAR

KORBAN V.KH., KORBAN D.V., DEGTYAROVA L.N.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications
Kuznechna st., 1, Odessa, 65029, Ukraine
l.demenko@ukr.net*

Аннотация. В статье рассматривается возможность реализации основных информационных параметров электромагнитной волны при проведении радиолокационных наблюдений метеорологических объектов.

Ключевые слова: метеорологические радиолокаторы, параметры электромагнитной волны, кучево-дождевые облака, радиолокационная отражаемость, дифференциальная фаза, линейное дифференциальное отношение, параметры Стокса, линейные логарифмические приемники.

Анотація. У статті розглядається можливість реалізації основних інформаційних параметрів електромагнітної хвилі при проведенні радіолокаційних спостережень метеорологічних об'єктів.

Ключові слова: метеорологічні радіолокатори, параметри електромагнітної хвилі, купчасто-дощові хмари, радіолокаційна відбиваність, диференційна фаза, лінійне диференційне відношення, параметри Стокса, лінійні логарифмічні приймачі.

Abstract: The possibility of realization of the basic information parameters of the electromagnetic wave during the radar observations of meteorological facilities.

Key words: weather radars, the parameters of the electromagnetic wave, cumulonimbus clouds, radar reflectivity, differential phase, linear differential ratio, the Stokes parameters, linear logarithmic receivers.

В настоящее время на сети гидрометслужбы используются импульсные когерентные и некогерентные МРЛ, работающие на частотах от 5000 до 10 000 МГц с гарантированным сроком службы магнетронов более 50 000 часов [1–7]. Несмотря на значительное количество МРЛ, существующие ограничения информативности используемых параметров электромагнитной волны существенно снижают их эффективность при оперативной работе. Даже использование быстродействующей вычислительной техники, высокого уровня специального программного обеспечения и быстродействующих каналов связи не позволяют обеспечить радиолокационный прогноз наиболее полной информацией о развитии опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевыми облаками. Даже размещение 128 МРЛ на территории США, совмещение радиолокационных данных МРЛ со спутниковыми изображениями облачности и данных других видов метеонаблюдений не повысило эффективности получаемой радиолокационной информации, особенно о режиме штормооповещения.

Поэтому возникает необходимость в использовании не только амплитудных и частот-

ных параметров электромагнитной волны, но и поляризационных, обладающих высокой информативностью. Метеорологические радиолокаторы используют поперечные электромагнитные волны, которые в различных плоскостях обладают различными свойствами и поэтому их воздействие на метеобъект также будут различными.

Анализ опыта создания радиолокационной метеорологической сети в наиболее развитых странах (реализация проекта NEXRAD в США [8] и создание MAPC в Западной Европе [9]) показал, что создана многофункциональная метеорологическая радиолокационная сеть в каждой экономически развитой стране для обеспечения штормового оповещения населения и организаций об опасных стихийных явлениях погоды. При создании автоматизированной или неавтоматизированной сети метеорологических радиолокаторов устанавливаются приоритеты задач в зависимости от повторяемости опасных погодных явлений для радиолокационной информации, позволяющей обеспечить минимальный ущерб от стихийного явления. В США приоритетным является радиолокационное обнаружение торнадо, в Великобритании – гидрологический радиолокационный прогноз, в России и Украине – штормовое предупреждение об опасных стихийных явлениях и обеспечение радиолокационной метеорологической информацией авиации. Для каждой страны является обязательным ключевое требование – универсальность, надежность и эффективность радиолокационного метеорологического раннего и точного обнаружения опасных явлений погоды. К потребителям метеорологической радиолокационной информации относятся метеорологическая и гидрологическая службы, сельское хозяйство, транспорт, строительство, оборона, энергетика и связь, коммунальное и лесное хозяйство и др.

Позиция для размещения МРЛ должна соответствовать требованиям по технике безопасности и строго соответствовать границам санитарно-защитной зоны. При необходимости разделения передающего и приемного устройств необходимо учитывать потери электромагнитной энергии в волноводе, которые составляют 0,13 дБ/м при $\lambda = 3$ см и при $\lambda = 5,6$ см.

Вся информация сети МРЛ поступает каждые 15 мин на центральный компьютер, размещенный в Гидрометцентре или в штабе метеослужбы данной страны и состоящий из двух процессоров (основного и резервного) емкостью 2 мегабайта и с двумя дисками по 10 мегабайт (в каждой стране могут быть другие емкости процессоров). На рис. 1 показана функциональная схема взаимодействия радиолокационной, спутниковой, наземной гидрологической информации в проекте COST-72 [7].

Базовые данные – радиолокационная отражаемость, средняя радиальная скорость и ширина спектра радиальной скорости после обработки выводятся на дисплей МРЛ и одновременно анализируются с использованием алгоритмов, соответствующих опасным явлениям погоды, таким как:

- 1 Шквал (скорость ветра больше 25 м/с).
- 2 Смерч (торнадо).
- 3 Сильный ливень ($I = 30$ мм/ч).
- 4 Сильный дождь (50 мм за 12 часов).
- 5 Продолжительные дожди (100 мм за двое суток).
- 6 Крупный град с грозой ($d = 20$ мм и более).
- 7 Наводнения.
- 8 Тропические циклоны.

Радиолокационная оценка отражающих свойств частиц облаков и осадков производит-

ся по следующим параметрам:

- 1 Эффективная площадь рассеяния σ .
- 2 Удельная площадь обратного рассеяния частиц облаков и осадков η .
- 3 Радиолокационная отражаемость Z .

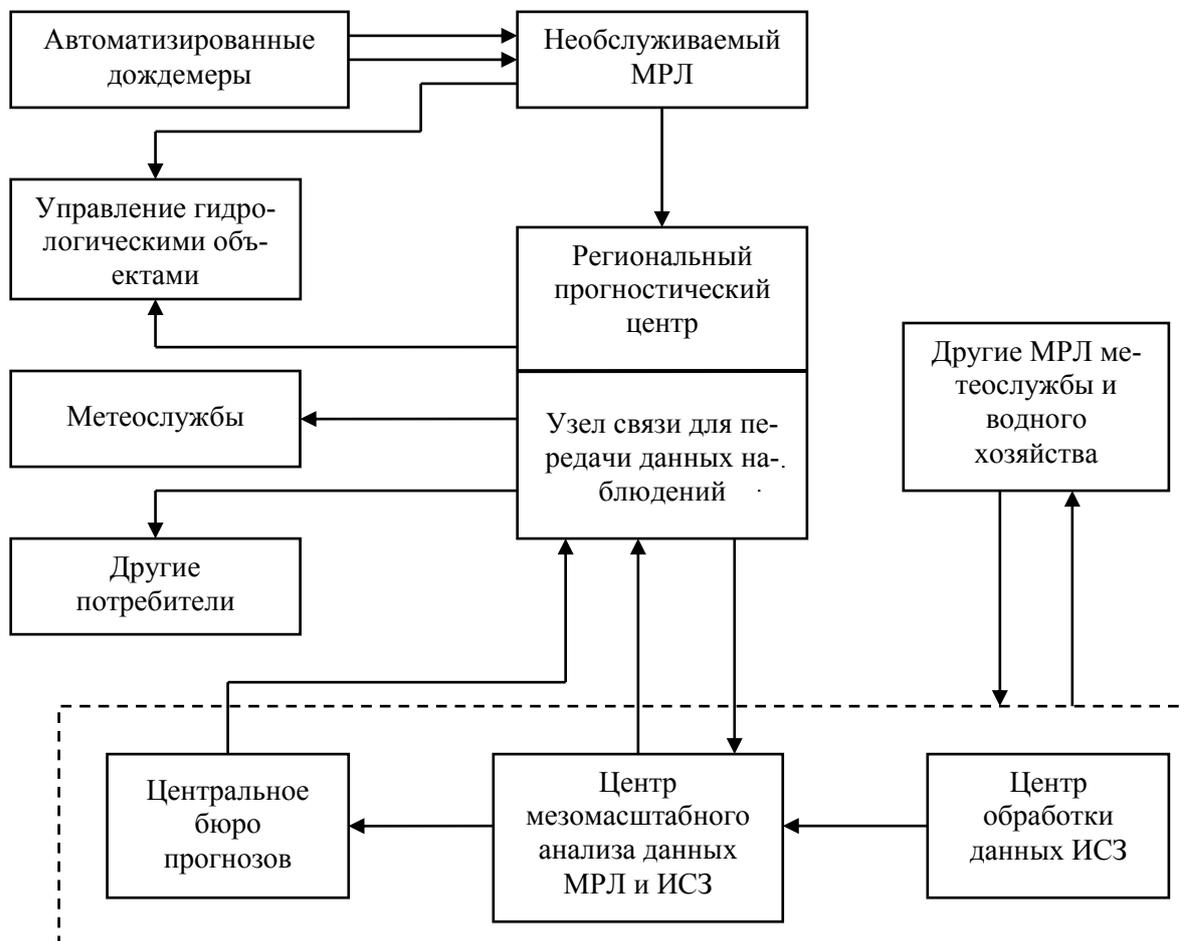


Рисунок 1 – Функциональная схема взаимодействия автоматизированной радиолокационной, спутниковой, наземной гидрологической информации в проекте COST-72

ЭПР определяется в соответствии с соотношением:

$$\sigma = \frac{64 \pi^5 d^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (1)$$

где m — комплексный показатель преломления частицы облаков или осадков; $D = 2a$ — диаметр частиц.

Удельная площадь обратного рассеяния облаков и осадков:

$$\eta = \sum_1^N \frac{\sigma_i}{V_{\text{эф}}}, \quad (2)$$

где η в м^{-1} ; N — число частиц в эффективном объеме $V_{\text{эф}}$.

Радиолокационная отражаемость:

$$Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \eta, \quad (3)$$

где λ — длина волны, м; η в м^{-1} ; Z в м^3 .

Связь между отражающими свойствами частиц облаков или осадков, радиолокационными параметрами электромагнитной волны и условиями ее распространения устанавливает уравнение радиолокации метеорообъектов для некогерентной МРЛ

$$\bar{P}_{\text{отр}} = \frac{\pi^3 P_{\text{изл}} G^2 \theta^2 c \tau_{\text{изл}}}{512 R^2 \lambda^2} \sum_{d_i} N(D_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 K_{\text{зап}} \cdot 10^{-0,2 \int_0^R \gamma_{\Sigma}(R) dR}, \quad (4)$$

где $\bar{P}_{\text{отр}}$ — средняя мощность, отраженная от метеорообъекта, Вт; $P_{\text{изл}}$ — мощность, излучаемая антенной МРЛ, Вт; G — коэффициент направленного действия антенны МРЛ; θ — ширина диаграммы направленности антенны, град; c — скорость света, м/с; $\tau_{\text{изл}}$ — длительность излучаемых импульсов, с; R — расстояние до метеорообъекта, км; λ — длина волны, см; N — число частиц облаков или осадков в отражающем радиолокационном объеме; d — диаметр частиц, мм; $K_{\text{зап}}$ — коэффициент заполнения частицами отражающего объема метеорообъекта; γ_{Σ} — суммарный коэффициент ослабления электромагнитной энергии в атмосфере, дБ/км.

При использовании когерентных доплеровских МРЛ, принцип получения радиолокационной информации об облаках и связанных с ними опасных явлений погоды (ОЯП) основан на использовании эффекта Доплера, заключающегося в том, что частота эхо-сигналов о метеорообъекте меняется при перемещении объекта и МРЛ относительно друг друга. Информация о метеорообъекте заключается в разности частот излученного и принимаемого сигналов при условии сохранения информации о фазе излученного сигнала до момента прихода отраженного. Уравнение радиолокации для доплеровской МРЛ запишется в виде:

$$F_{\text{д}} = \frac{2V_R}{\lambda}, \quad (5)$$

где V_R — радиальная скорость перемещения метеорообъекта, м/с; $F_{\text{д}}$ — доплеровская частота, Гц.

В некогерентных МРЛ информация о метеорообъекте заключена в величине эхо-сигнала, в когерентных доплеровских МРЛ в разности частот между принимаемым и излучаемым сигналами, т.е. в доплеровской частоте.

К настоящему времени разработаны поляризационные методы и радиолокационная аппаратура для получения дополнительной информации о метеорообъектах [10], в которых в качестве информативных параметров электромагнитной волны о состоянии метеорообъекта используются:

– деполаризационное отношение в круговом базисе

$$CDR = \frac{\langle |S_{RR}|^2 \rangle}{\langle |S_{RL}|^2 \rangle}, \quad (6)$$

где R — индекс обозначения круговой поляризации правого вращения; L — для левого вращения; S_{RR} и S_{RL} — члены ковариационной матрицы рассеяния метеообъекта;

– дифференциальная отражаемость (отношение мощностей эхо-сигнала на горизонтальной и вертикальной поляризациях)

$$Z_{DR} = 10 \lg \frac{P_n}{P_v}. \quad (7)$$

Для измерения интенсивности осадков используется измерение радиолокационной отражаемости Z и дифференциальной отражаемости Z_{DR} .

Тогда формула для измерения интенсивности выпадающих осадков записывается в виде:

$$I = C_0(\mu) Z_{DR}^{-1.5} Z, \quad (8)$$

где $C_0(\mu) = 1,93 \cdot 10^{-3}$.

Поляризационным параметром, измеряемым в HV -базисе, является линейное деполаризационное отношение LDR , представляющее собой отношение мощностей перекрестной и согласованной компонент эхо-сигнала метеообъекта, т.е.

$$LDR = 10 \lg \frac{P_{hv}}{P_{hh}}. \quad (9)$$

Используется в поляризационных измерениях характеристик метеообъекта и коэффициент взаимной корреляции

$$\rho_{hv} = \frac{\langle S_{hh} S_{vv} \rangle}{\langle |S_{hh}|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_{vv}|^2 \rangle^{1/2}}, \quad (10)$$

представляющий собой коэффициент взаимной корреляции диагональных элементов матрицы рассеяния S метеообъектов.

Использование в поляризационных измерениях дифференциальной фазы основано на фазовых отличиях эхо-сигналов на горизонтальной и вертикальной поляризациях

$$\Phi_{DR} = \delta + \left[2 \operatorname{Re} \int_0^R (K_h - K_v) dR \right] \times \sin^2(x) r, \quad (11)$$

где K_h и K_v — постоянные распространения на горизонтальной и вертикальной поляризациях, при условии, что все частицы ориентированы вертикально или горизонтально; δ – разность фазовых добавок на вертикальной и горизонтальной поляризациях;

$r = \exp(-2\sigma_\psi^2)$ — параметр, характеризующий степень упорядоченности ориентации частиц метеообъекта; $(\sin^2 x)$ — множитель, описываемый изменение дифференциальной фазы с изменением угла места антенны; $\text{Re}(K_h - K_v) = K_{DR}$ является удельным фазовым сдвигом.

В круговом поляризационном базисе используется круговое деполаризационное отношение (6), а также комплексный коэффициент взаимной корреляции ортогональных компонент эхо-сигнала, равный коэффициенту взаимной корреляции диагональных и недиагональных элементов матрицы рассеяния метеообъекта в круговом базисе:

$$\rho_R = \frac{\langle S_{RR} S_{RL} \rangle}{\langle |S_{RR}|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_{RL}|^2 \rangle^{1/2}}. \quad (12)$$

Проведенный анализ амплитудных, частотных и поляризационных методов, используемых в метеорологической радиолокации, дает основание утверждать, что каждый из них дополняет друг друга и отсутствует единый радиолокационный метод, который позволяет сконцентрировать амплитудные, частотные (фазовые) и рассмотренные поляризационные параметры электромагнитной волны, обладающие различной информативностью и определенными недостатками, что вызывает трудности их практической реализации в радиолокационных метеорологических поляриметрах. Поэтому до настоящего времени не созданы многофункциональные радиолокационные поляриметры. Имеются одноканальные поляриметры с переключением ортогональных поляризаций на излучение и использование одного приемного канала. Однако, отраженные от метеообъектов сигналы на вертикальной и горизонтальной поляризациях отличаются по мощности и по фазе и поэтому для измерения дифференциальной фазы возникает необходимость в сохранении абсолютной фазы эхо-сигнала вертикальной поляризации и измерение фазового сдвига после приема и измерения абсолютной фазы горизонтальной поляризации. Кроме этого необходимо вводить множитель, учитывающий степень упорядоченности ориентации частиц в метеообъекте (которая неизвестна), ориентацию волнового вектора излучаемой волны по отношению оси вращения частиц метеообъекта и др.

Наиболее перспективными являются двухканальные метеорологические радиолокационные поляриметры с регулируемыми поляризационными параметрами излучаемой волны и двухканальным приемным устройством. Основными факторами, снижающими точность поляризационных измерений эхо-сигналов метеообъектов, являются наличие кросс-поляризационной компоненты, не идентичность ДН антенны, не идеальность развязки в ортогональных каналах.

Указанные недостатки, присущие антенно-волноводному двухканальному высокочастотному тракту, легко устраняется использованием более совершенных антенно-волноводных элементов и калибровкой.

В общем случае поляризация электромагнитной волны является эллиптической, в которой колебание электрического вектора происходит таким образом, что отношение амплитуд ортогональных компонент и разности фаз между ними остаются постоянными, а сами колебания можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_{xm} e^{j\omega t} \\ E_y &= E_{ym} e^{j(\omega t - \phi_y)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Если колебания электрического вектора электромагнитной волны представлены в форме (13), из них можно сформировать четыре параметра Стокса [11]

$$\left. \begin{aligned} I &= E_x^2 + E_y^2 \\ Q &= E_x^2 - E_y^2 \\ U &= 2 E_x E_y \cos \Phi_{xy} \\ V &= 2 E_x E_y \sin \Phi_{xy} \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ — полная интенсивность волны; Q — разность интенсивностей ортогональных компонент волны; U и V — корреляционная связь между амплитудами и фазами ортогональных компонент.

Неполяризованное излучение может быть представлено в виде смеси двух некогерентных эллиптически поляризованных волн равной интенсивности, но с противоположным направлением вращения электрических векторов волны. Для неполяризованной волны $Q = U = V = 0$. Можно использовать и другие параметры: интенсивность I^2 , плоскость поляризации

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{U}{Q}; \quad (15)$$

степень поляризации:

$$m = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (16)$$

и эллиптичность:

$$\sin 2\alpha = \frac{V}{I}. \quad (17)$$

В уравнениях (17) и (15) α и β — коэффициент эллиптичности и угол ориентации поляризационного эллипса.

Параметры Стокса целесообразно использовать совместно с другими параметрами в качестве информативных выходных величин метеорологического радиолокационного многофункционального некогерентного радара. В таком радаре будем использовать игольчатую диаграмму направленности антенны, формирование которой можно осуществлять облучателем с осевой симметрией, одинаково воспринимающий сигналы в любой плоскости поляризации — круглый рупор. С целью компенсации паразитной линейной поляризации в антенне используется контррефлектор (рис. 2), симметрирующий ДН антенны в E и H плоскостях.

Контррефлектор представляет собой (центральная часть) сплошной диск, а периферийная часть образована концентрическими проволоками. Форма ЭПР показана пунктиром. Из-

менением размера центральной части производится регулировка ДН антенны. Если излучается электромагнитная волна круговой поляризации и эхо-сигнал тоже круговой поляризации, паразитная линейная поляризация составляет несколько процентов и с ней можно не считаться.

На вход антенны ММРС первичная радиолокационная информация о метеообъекте поступает с пространственным разрешением по дальности от 150 до 300 метров и по углу места от $0,5-1^\circ$ в диапазоне дальностей до 300 км; со скоростью вращения антенны 6 об/мин. Время обновления информации, поступающей на вход системы обработки и визуализации на индикаторах ММРС, не превышает 5-10 мин. Для оценки поляризационных характеристик эхо-сигналов используются линейные приемники с компараторами, а для оценки других параметров эхо-сигналов электромагнитной волны используются логарифмические приемники с изменением входного сигнала 80-100 дБ.

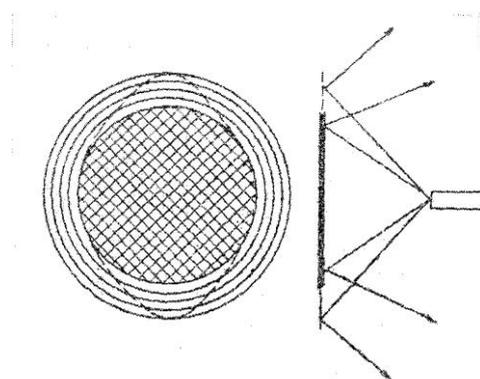


Рисунок 2 – Контррефлектор, симметрирующий диаграмму антенны в E и H плоскостях

Преимущество некогерентных МРЛ по сравнению с когерентными состоит в простоте технической реализации получения информации о метеообъекте, так как не требуется стабилизировать частоту излучаемых сигналов и производить фазовые измерения отраженной волны.

В некогерентных МРЛ оценку ширины доплеровского спектра скоростей можно проводить по методу парных импульсов [1], используя связь коэффициента корреляции огибающей с величиной параметра σ_v , измерение скорости движения метеообъекта определяется соотношением неопределенности:

$$RV = \frac{c\lambda}{8} . \quad (18)$$

Параметр σ_v , соответствующий ширине спектра скоростей метеообъекта на удалении R , определяется соотношением:

$$\frac{\lambda}{2T} \gg \sigma_v, \quad (19)$$

где T - период следования отраженных импульсов от метеообъекта.

Функциональная схема ММРС некогерентного типа, реализующая доплеровский, амплитудный и поляризационный методы показана на рис. 3, в которую входят: 1 – передатчик импульсных некогерентных колебаний; 2 – делитель мощности; 3 – формирователи вида поляризации электромагнитной волны на излучение; 4 – антенные переключатели; 5 – форми-

рователь и разделитель поляризации; 6 – всеполяризованная антенна; 7 – линейные приемники ортогональных компонент эхо-сигнала; 8 – логарифмические приемники; 9 – измеритель радиолокационной отражаемости; 10 – измеритель коэффициента анизотропии; 11 – устройство формирования и измерения параметров Стокса; 12 – индикаторы и дисплей компьютера; 13 – измерители коэффициентов поляризации.

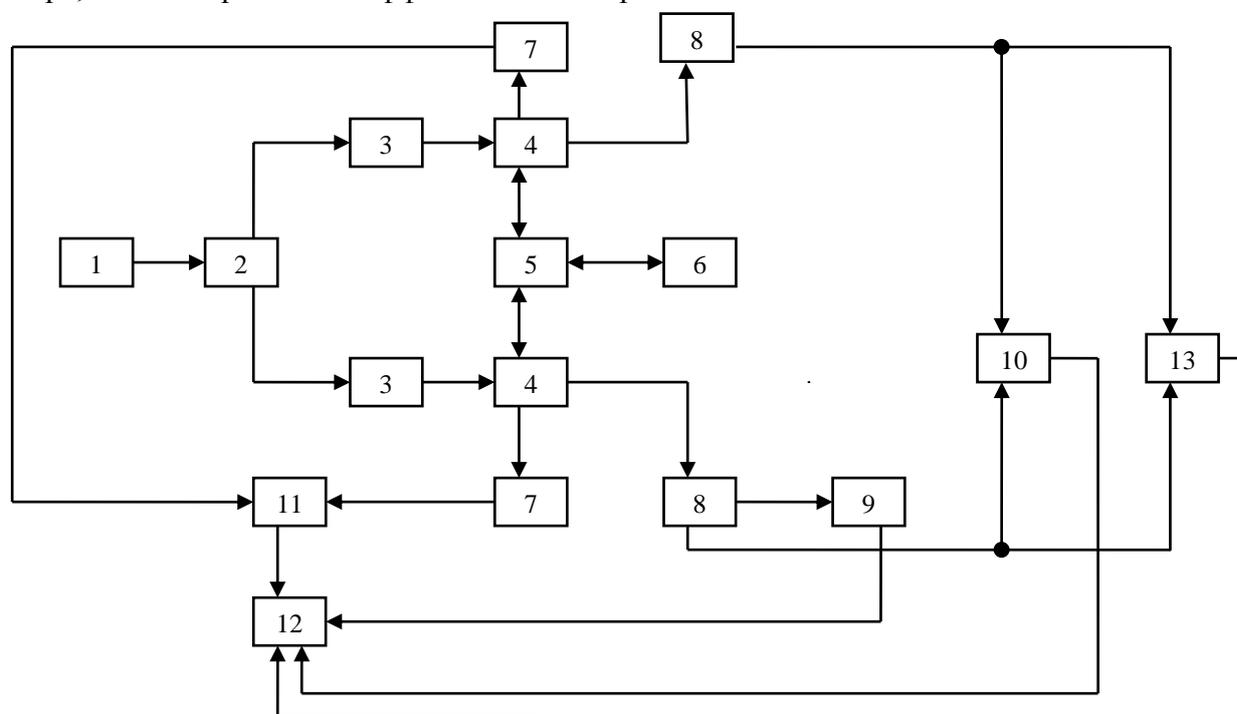


Рисунок 3 – Функциональная схема многофункциональной МРЛ

Работа ММРЛ происходит следующим образом. Передатчик 1 вырабатывает и формирует высокочастотные импульсы определенной амплитуды, длительности и частоты, которые делителем мощности 2 разделяются на два ортогональных канала, в которых включены формирователи вида поляризации на излучение 3. Ортогональные составляющие волны E_x и E_y с заданными амплитудами и разностью фаз через антенные переключатели ортогональных каналов 4, поступают на формирователь поляризации 5 электромагнитной волны на излучение (линейной, круговой или эллиптической), с выхода которого подаются на антенну 6 и излучаются в пространство. Эхо-сигналы метеообъектов принимаются антенной 6 и через разделитель поляризации 5 и через антенные переключатели 4 поступают на линейные приемники 7 и логарифмические приемники 8, где происходит их усиление и частотное преобразование. С выхода линейных приемников ортогональные компоненты отраженной волны поступают на устройство формирования параметров Стокса 11. С выхода логарифмических приемников 8 сигналы ортогональных компонент поступают на измеритель коэффициента анизотропии 10 и устройство 13 измерения коэффициентов поляризации Z_{DR} , LDR , CDR , Φ_{DR} .

Сформированные параметры Стокса поступают с выхода формирователя 11 на индикатор и дисплей компьютера. Сетевой режим измерения радиолокационной отражаемости эхо-сигналов метеообъекта осуществляется измерителем 9, выход которого соединен с индикаторами кругового обзора и дальность-высота в блоке 12, выходы измерителей 10 и 11 соединены с индикаторами и дисплеем компьютера 12.

Практически полная радиолокационная информация о внутренней структуре метеообъекта и ее изменении в пространстве и времени измеряется и анализируется в реальном вре-

мени в течении за 15 ... 20 мин от зарождения метеообъекта до его диссипации с полным прогнозом и диагнозом опасных явлений погоды, связанных с метеообъектами.

ВЫВОДЫ

1 Проведён анализ существующих метеорологических радиолокационных систем и их информационных параметров, позволяющих установить количественные радиолокационные характеристики метеообъектов, даны их недостатки.

2 Предложена функциональная схема многофункционального метеорологического радиолокационного радара, реализующего амплитудные, фазовые (частотные) и поляризационные параметры электромагнитной волны, что позволяет получить наиболее полную информацию о метеообъекте.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Довиак Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Р. Довиак, Д. Зрнич. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 512 с.
- 2 Рыжков А.В. Характеристики метеорологических РЛС / Рыжков А. В.. – Зарубежная радиоэлектроника, № 4, 1993. – С.29–34.
- 3 Beyer S. Aims and advantages: a new generation of distributed radar acquisition and control systems (DURAC) / S. Beyer, V. Fleuth, K. Mähner, C. Schleiermacher. – COST 75, 1999. – P.221–228.
- 4 Cavalli R. Operational experience with the new generation of Swiss radars. – COST 75, 1999. – P.159–164.
- 5 Gematronie GmbH, Germany, “2 1st centry Weather monitoring” “Meteor 500 c Doppler Weather radar”, Prospects, 1999. – P.35.
- 6 Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. – Л.: Гидрометеиздат, 1993. – 358 с.
- 7 Базлова Т.А. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / [Т.А. Базлова, Н.В. Бочарников, Г.Б. Брылев и др.] – С. - П.: Гидрометеиздат, 2002. – 331 с.
- 8 Golden J.H. The prospects and promise of NEXRAD: 1990’S and beyond. – COST 73, 1989. – P.17-36.
- 9 Collier C.G. The development of a Weather radar network in Western Europe. – COST 73, 1989. – P.3-16.
- 10 Рыжков А.В. Поляризационные методы в метеорологической радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. - № 4. - 1993. – С.18-28.
- 11 Канарейкин Д.Б. Морская поляриметрия / Канарейкин Д.Б., Потехин В.А., Шишкин И.Ф.. – Л.: Судостроение, 1968. – 327 с.

REFERENCES

- 1 Doviak R. Doplerovskie radiolokatory i meteorologicheskie nablyudeniya / R. Doviak, D. Zrnich. – L.: Gidrometeoizdat, 1988. – 512 s.
- 2 Ryzhkov A.V. Harakteristiki meteorologicheskikh RLS / Ryzhkov A. V.. – Zarubezhnaya radioelektronika, № 4, 1993. – S.29–34.
- 3 Beyer S. Aims and advantages: a new generation of distributed radar acquisition and control systems (DURAC) / S. Beyer, V. Fleuth, K. Mahner, C. Schleiermacher. – COST 75, 1999. – P.221–228.
- 4 Cavalli R. Operational experience with the new generation of Swiss radars. – COST 75, 1999. – P.159–164.
- 5 Gematronie GmbH, Germany, “2 1st centry Weather monitoring” “Meteor 500 c Doppler Weather radar”, Prospects, 1999. – P.35.
- 6 Rukovodstvo po proizvodstvu nablyudenij i primeneniyu informacii s neavtomatizirovannyh radiolokatorov MRL-1, MRL-2, MRL-5. RD 52.04.320-91. – L.: Gidrometeoizdat, 1993. – 358 s.
- 7 Bazlova T.A. Meteorologicheskie avtomatizirovannye radiolokacionnye seti / [T.A. Bazlova, N.V. Bocharnikov, G.B. Brylev i dr.] – S. - P.: Gidrometeoizdat, 2002. – 331 s.
- 8 Golden J.H. The prospects and promise of NEXRAD: 1990’S and beyond. – COST 73, 1989. – P.17–36.
- 9 Collier C.G. The development of a Weather radar network in Western Europe. – COST 73, 1989. – P.3–6.
- 10 Ryzhkov A.V. Polyarizacionnye metody v meteorologicheskoy radiolokacii // Zarubezhnaya radioelektronika. - № 4. - 1993. – S.18–28.
- 11 Kanarejkin D.B. Morskaya polyarimetriya / Kanarejkin D.B., Potehin V.A., Shishkin I.F.. – L.: Sudostroenie, 1968. – 327 s.