

УДК 621.396.99

**ДИСТАНЦИОННАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА
АММИАКА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ**

Корбан В.Х., Дегтярева Л.Н., Войтюшенко В.И., Журба А.С.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.*

kafedra.autp@onat.edu.ua

**ДИСТАНЦІЙНА РАДІОЛОКАЦІЙНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ
АМІАКУ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ**

Корбан В.Х., Дегтярьова Л.М., Войтюшенко В.І., Журба А.С.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.*

kafedra.autp@onat.edu.ua

**REMOTE RADAR SYSTEM MONITORING OF AMMONIA
IN ATMOSPHERIC AIR**

Korban V.Kh., Degtjarjeva L.N., Voytyushenko V.I., Zhurba A.S.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa 65029, Ukraine.*

kafedra.autp@onat.edu.ua

Аннотация: Показана возможность дистанционного радиолокационного обнаружения аммиака в атмосфере и уменьшение его физиологического воздействия.

Ключевые слова: аммиак, дипольные молекулы, электромагнитное поле, метеорологический поляриметр, растворимость в воде, вращающийся момент, сила Лоренца, диэлектрическая проницаемость.

Анотація: Показана можливість дистанційного радіолокаційного виявлення аміаку в атмосфері і зменшення його фізіологічного впливу.

Ключові слова: аміак, дипольні молекули, електромагнітне поле, метеорологічний поляриметр, розчинність у воді, обертальний момент, сила Лоренца, діелектрична проникність.

Abstract: The possibility of remote radar detection of ammonia in the atmosphere and a reduction of its physiological effects.

Key words: ammonia molecule dipole, the electromagnetic field meteorological polarimeter water solubility torque Lorentz force permittivity

Сетевые радиолокационные метеорологические станции как в нашей стране, так и за рубежом являются специализированными радиолокаторами штормового оповещения и градозащиты и решают следующие задачи [1]:

- обнаружение и определение местоположения очагов гроз, града и ливневых осадков в радиусе 300 км;
- определение горизонтальной и вертикальной протяженности метеообразований, направления и скорости их смещения;
- определение верхней и нижней границы облаков;
- измерение водности облаков и интенсивности выпадающих осадков;
- штормового оповещения об опасных явлениях погоды.

Решение задач, связанных с загрязнением атмосферного воздуха, радиолокационные метеорологические сети осуществлять по своим конструктивным особенностям и функциональному назначению не могут.

Изменение климатических условий приводят не только к природному, но и техногенному загрязнению атмосферы.

В связи с этим возникает необходимость в разработке и внедрению нового поколения перспективных метеорологических многопараметрических радиолокаторов с более совершенными оперативными методами обработки и представления радиолокационной информации.

Целью данной статьи является разработка функциональной схемы метеорологического радиолокатора с поляризационной селекцией эхо-сигналов, позволяющего обнаруживать и распознавать аммиачный объем атмосферы и уменьшать его физиологическое воздействие на человека и окружающий мир.

Известно [1, 2, 3, 4], что диэлектрическая проницаемость газа (ϵ) определяется его молекулярным весом, плотностью, абсолютной температурой, электрическими свойствами молекул и их поляризуемостью. Молекулы многих газов в отсутствие внешнего электрического поля, имеют собственное электрическое поле и являются полярными. К таким молекулам относятся молекулы воды, аммиака и другие. Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов в таких молекулах не совпадают, и они образуют электрический диполь, момент которого будет направлен вдоль электрических силовых линий внешнего поля. Единица объема атмосферного воздуха, состоящего из полярных молекул, характеризуется степенью или вектором поляризации. Молекулы сухого воздуха в атмосфере не имеют постоянного дипольного момента и могут поляризоваться только при приложении внешнего электрического поля. Если внешнее электрическое поле отсутствует, а в атмосфере имеется водяной пар или аммиак, дипольные моменты молекул этих газов будут направлены вдоль оси, соединяющей центры тяжести положительных и отрицательных зарядов, которые за счет теплового движения, ориентированы в пространстве случайным образом.

При создании внешнего электрического поля путем излучения антенной МРЛ электромагнитной волны, электрическая сила, которая будет действовать на каждую молекулу, что поляризуется, будет складываться из сил внешнего и внутреннего электрического поля. Сделаем допущение, что во влажной атмосфере с аммиаком, молекулы водяного пара и аммиака имеют один и тот же дипольный момент Me .

В соответствии с [2] вектор поляризации любого газа определяется из условий:

$$\alpha = nMe, \quad (1)$$

где n – концентрация молекул в m^3 атмосферного воздуха, а его относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' будет иметь вид:

$$\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 2} = \frac{n\alpha}{3}. \quad (2)$$

Для сухого атмосферного воздуха $\epsilon' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \approx 1,00300$, тогда:

$$\epsilon = 1 + n\alpha, \quad (3)$$

а с учетом влияния температуры и давления относительная диэлектрическая проницаемость запишется в виде:

$$\epsilon' = 1 + A \frac{P_{cb}}{T}. \quad (4)$$

По данным Бина и Даттона [3] коэффициент $A = 77,6$; P – давление в (гПа); T – температура в (K).

Если в атмосфере присутствует водяной пар и аммиак, диэлектрическая проницаемость их смеси определяется со следующего уравнения:

$$\varepsilon' = 1 + \varepsilon n_{\text{вп}} \alpha_{\text{вп}} + n_{\text{ам}} \alpha_{\text{ам}}. \quad (5)$$

При стандартных температуре и давлении соотношение (5) записывается в виде:

$$\varepsilon' = 1 + N_{V_0} \frac{273}{1013T} (P_{\text{вп}} \alpha_{\text{вп}} + P_{\text{ам}} \alpha_{\text{ам}}),$$

где $n = n_0 \frac{273}{1013T} \frac{P}{T}$, а $n_0 = 2,6873 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

В целом для атмосферы, состоящей из сухого воздуха, водяного пара и аммиака, диэлектрическая проницаемость запишется следующим образом:

$$\varepsilon' = 1 + A \frac{P_{\text{св}}}{T} + B \frac{P_{\text{вп}}}{T} + C \frac{P_{\text{ам}}}{T} + D \frac{P_{\Sigma}}{T^2}. \quad (6)$$

где $P_{\text{св}}$, $P_{\text{вп}}$, $P_{\text{ам}}$ – парциальное давление сухого воздуха, водяного пара и аммиака.

Коэффициенты B, C, D изменяются от $3,7 \cdot 10^5 \text{ К}^2/\text{гПа}$ до $77,6 \text{ К/гПа}$.

Последний член в уравнении (6) описывает вклад в диэлектрическую проницаемость дипольного момента молекул водяного пара и аммиака.

В случае сухой атмосферы с аммиаком диэлектрическая проницаемость запишется в виде:

$$\varepsilon' = 1 + A \frac{P_{\text{св}}}{T} + B \frac{P_{\text{ам}}}{T}. \quad (7)$$

Молекулы сухого воздуха под воздействием внешнего электрического поля напряженностью \dot{A} могут приобретать деформационную или электронную поляризуемость.

Вектор поляризации α деформированных молекул газов сухой атмосферы имеет известную зависимость от их плотности, поляризуемости и величины напряженности электрического поля E :

$$\alpha = n \beta \varepsilon_0 E, \quad (8)$$

где β – поляризуемость молекулы.

С учетом (8) относительная диэлектрическая проницаемость сухой атмосферы ε' определяется из условия:

$$\varepsilon' = 1 + \beta \alpha = 1 + 4 \pi r^2 n \beta \varepsilon_0 E, \quad (9)$$

Диэлектрическая восприимчивость сухой атмосферы $\chi = \chi_r = \beta_r \cdot N_r$, а влажной атмосферы $\chi = \chi_r + \chi_{\text{вп}} = \beta_r \cdot N_r + \left(\beta_{\text{вп}} + \frac{\beta_{\text{вп}}}{T} \right) \cdot N_{\text{вп}}$.

В соответствии с [4], число молекул газа в сухой атмосфере n_r определяется следующим образом:

$$N_r = \frac{P}{KT}, \quad (10)$$

где P – давление в Паскалях; T – абсолютная температура K ; K – постоянная Больцмана $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

Число молекул водяного пара $N_{\text{вп}}$ во влажной атмосфере определяется из условия:

$$N_{\text{вп}} = \frac{e}{KT}, \quad (11)$$

где e – парциальное давление водяного пара в Па.

Диэлектрическая восприимчивость атмосферы, как среды, состоящей из «сухих» газов, водяного пара и молекул аммиака может быть представлена следующей зависимостью [5]:

$$\chi = \chi_{\Gamma} + \chi_{\text{вп}} + \chi_{\text{ам}}, \quad (12)$$

где $\chi_{\text{ам}} = \beta_{\text{ам}} N_{\text{ам}}$.

Вектор поляризации равен векторной сумме дипольных моментов одного кубического метра атмосферного воздуха.

Дипольный момент молекул водяного пара $M_{\text{вп}} = 6,36 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, а аммиака $M_{\text{ам}} = 4,88 \cdot 10^{-30}$ Кл·м и при отсутствии внешнего электрического поля эти моменты ориентированы в пространстве беспорядочно, а вектор поляризации объема атмосферы равен нулю.

Под воздействием внешнего электрического поля, которое создает антенна метеорологического радиолокатора, полярные молекулы водяного пара и аммиака деформируются с изменением их дипольных моментов и ориентацией вдоль линий напряженности электрического поля электромагнитной волны, т.е. возникает ориентационная поляризуемость, степень которой определяется напряженностью электрического поля и температурой рассматриваемого объема атмосферного воздуха. Энергия молекулярного диполя определяется дипольным моментом P_e , напряженностью E электрического поля электромагнитной волны, поляризуемостью молекулы α и вычисляется по известной формуле [3]:

$$W = P_e E \cos \alpha, \quad (13)$$

а величина вектора поляризации находится из условия

$$P = n P_e = n \alpha \varepsilon_0 E, \quad (14)$$

где n - концентрация полярных молекул в м^3 атмосферного воздуха;

ε_0 - электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²), $n = 10^{25}$ молекул в 1м^3 .

Еще в первой половине двадцатого века было установлено, что молекулярные силы имеют электрическое происхождение. Характеристикой взаимодействия между молекулами является электрическая система, состоящая из двух зарядов q , равных по абсолютной величине, но противоположных по знаку, которая носит название диполя. Электрической характеристикой диполя является электрический момент, определенный зависимостью [2]

$$P_e = ql, \quad (15)$$

где q – заряд диполя; l – вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному, а его модуль является плечом диполя.

И хотя диполь представляет собой электрически нейтральную систему, однако они взаимодействуют, т.к. расположены в разных точках объема атмосферного воздуха. Взаимодействие между диполями происходит при различном их расположении в пространстве, а сила взаимодействия зависит не только от расстояния между ними, но и от взаимной ориентации.

Каждый заряд создает вокруг себя электрическое поле, силовой количественной характеристикой которого является напряженность E . Будем рассматривать напряженность поля, создаваемого диполем по оси диполя E_{\parallel} , а по нормам к середине оси диполя E_{\perp} , интересующую нас с точки зрения создания внешнего поля круговой поляризации. В соответствии с [2], напряженности поля E_{\parallel} и E_{\perp} вычисляются по следующим формулам:

$$E_{\parallel} = \frac{2P_e}{4\pi\epsilon_0 r^3}, \quad (16)$$

$$E_{\perp} = \frac{P_e}{4\pi\epsilon_0 r^3}, \quad (17)$$

где r – расстояние между центрами диполей.

Из (16) и (17) видно, что напряженность поля, создаваемого диполем, пропорциональна моменту диполя и обратно пропорциональна кубу расстояния от точки поля до центра диполя.

Под действием внешнего электрического поля в молекулах аммиака и водяного пара индуцируются дипольные моменты:

$$\begin{aligned} P'_{ам} &= \alpha \epsilon_{0ам} E; \\ P'_{вп} &= \alpha \epsilon_{0вп} E. \end{aligned} \quad (18)$$

С учетом того, что поляризуемость молекул $\alpha = 4\pi r^3$, уравнения (18) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} P'_{ам} &= \frac{\alpha P_{ам}}{r^3}; \\ P'_{вп} &= \frac{\alpha P_{вп}}{r^3}. \end{aligned} \quad (19)$$

Дипольные молекулы аммиака и водяного пара в объеме атмосферного воздуха приобретают поляризационный заряд с поверхностной плотностью $\sigma_{пол}$, то есть возникает объемная поляризация с напряжённостью поля E , равной:

$$E = (\sigma - \sigma_{пол})\epsilon_0, \quad (20)$$

где σ – объемная плотность свободных электрических зарядов.

Поляризационный объемный заряд возникает под действием внешнего электрического поля, излучаемого антенной метеорологического радиолокатора.

Момент объемного диполя записывается в виде:

$$q_{пол} d = \sigma_{пол} \cdot V, \quad (21)$$

где d – диаметр объемного диполя.

Модуль объемного вектора поляризации запишется следующим образом:

$$P_v = \frac{q_{пол} d}{V}, \quad (22)$$

где q – дипольные моменты равномерно распределены по всем трем осям декартовой системы координат с ориентацией диполей по оси координат 0,5 вдоль и 0,5 против оси.

Весь объем атмосферы с полярными молекулами водяного пара и аммиака позволяет его рассматривать как диполь, состоящий из ассиметрично расположенных зарядов, алгебраическая сумма которых, равна нулю. Под воздействием внешнего электрического поля на объемный диполь будет действовать пара электрических сил, вращающий электрический момент которых равен произведению электрического момента диполя на напряженность поля и на синус угла между этими векторами.

Под действием вращающего момента электрических сил, диполь будет поворачиваться в электрическом поле электромагнитной волны до тех пор, пока он не окажется параллельным вектору напряженности электрического поля волны и для линейной поляризации электрического вектора вращающий момент и равнодействующая электрических сил равны

нулю. Это устойчивое равновесие объемного диполя. Энергия W диполя в электрическом поле волны определяется известным соотношением [3]:

$$W = P_v E_0 \cos \beta, \quad (23)$$

где β – угол поворота объемного диполя.

Поворот диполя осуществляется до тех пор, пока угол α не станет равным 0. При этом энергия диполя будет минимальной, т.е.:

$$W = -P_v E. \quad (24)$$

Напряженность электрического поля волны, излучаемой антенной МРЛ, рассчитывается по известной формуле:

$$E = \frac{\sqrt{30PGn}}{R} K_\delta F(\varphi) F(\alpha) K_a, \text{ В/м}, \quad (25)$$

где P – излучаемая мощность антенной МРЛ, Вт; G – коэффициент усиления антенны; n – коэффициент потерь в АВС МРЛ; R – расстояние до аммиачного объема атмосферы, м; K_ϕ – коэффициент, учитывающий влияние отражающей поверхности; $F(\varphi)$ – значение нормированной диаграммы направленности антенны в вертикальной площади; $F(\alpha)$ – значение нормированной диаграммы направленности антенны в горизонтальной площади; K_r – коэффициент, учитывающий неравномерность диаграммы направленности в горизонтальной площади.

Рассчитаем величину напряженности электрического поля, создаваемой антенной МРЛ-5 на расстоянии 10 км от места установки, используя следующие параметры:

1. длина волны, излучаемой антенной МРЛ-5 равна $\lambda = 3$ см;
2. излучаемая импульсная мощность $P_u = 10^6$ Вт ;
3. коэффициент усиления антенны: $G = 10^4$;
4. коэффициент потерь в АФС $\eta = -2,3$ дБ;
5. коэффициент, учитывающий влияние отражающей поверхности $K_\delta = 1,25$;
6. значение нормированной диаграммы направленности антенны в вертикальной площади $F(\varphi) = 1,5^\circ$;
7. значение нормированной диаграммы направленности антенны в горизонтальной площади $F(\alpha) = 1^\circ$;
8. коэффициент, учитывающий неравномерность диаграммы направленности в горизонтальной площади $K_r = 1$;
9. коэффициент усиления антенны: $G = 10^4$;
10. коэффициент потерь в АВС $\eta = 0,59$.

Подставив приведенные значения параметров антенны МРЛ-5 в (25), получим:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot 10^6 \cdot 10^4 \cdot 0,59}}{10^4} \cdot 1,25 \cdot 1,5 = 78,9, \text{ В/м} .$$

Так как вектор поляризации аммиачного объема атмосферы пропорционален напряженности электрического поля электромагнитной волны, то такой объем характеризуется электрической восприимчивостью χ , которая связана с вектором поляризации следующим соотношением [2]:

$$P = \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E. \quad (26)$$

Взаимосвязь диэлектрической проницаемости аммиачного объема атмосферы ε с его электрической восприимчивостью определяется известным соотношением

$$\varepsilon_{\text{ам}} = 1 + \chi. \quad (27)$$

Будем исходить из того, что в аммиачном объеме атмосферы молекулярные силы не зависят от общего числа молекул аммиака или от их плотности и между ними отсутствует взаимодействие.

Однако внешнее электрическое поле, излучаемое антенной МРЛ, выстраивает молекулы так, что их дипольные моменты складываются, увеличивая результирующее поле, действующее на каждую аммиачную молекулу. Диэлектрическая проницаемость объема воздуха с аммиаком зависит только от плотности n молекул аммиака и коэффициента поляризуемости α , и определяется соотношением [3]:

$$\frac{(\varepsilon - 1)}{(\varepsilon + 2)} = n \frac{\alpha}{3}. \quad (28)$$

Вектор поляризации аммиачных молекул в м^3 определяется с использованием следующего выражения при следующих значениях величин входящих в (2), то есть:

$$P_{\text{ам}} = n \cdot p_{\text{ам}} = 2,7 \cdot 10^{25} \cdot 4,88 \cdot 10^{-30} = 0,00013 \text{ Кл} \cdot \text{м}.$$

В аммиачном облаке дипольные молекулы, попадая в электрическое поле электромагнитной волны, ориентируются вдоль линии напряженности электрического поля под действием пары сил F , момент которой определяется соотношением [3]:

$$M = M_{\text{ам}} E \sin \alpha, \quad (29)$$

где α – угол между дипольным моментом и вектором напряженности электрического поля волны (рис. 1).

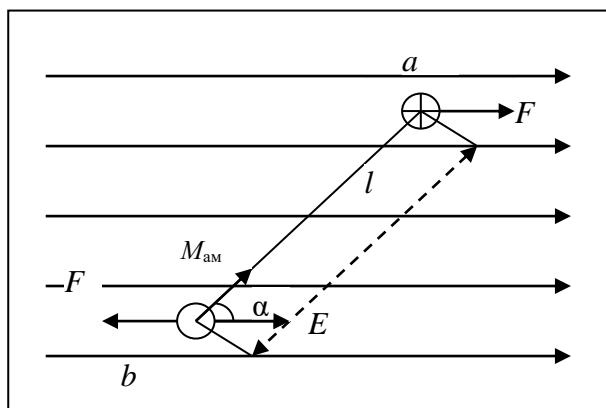


Рисунок 1 – Электрический диполь полярной молекулы аммиака в поле электромагнитной волны

Под действием вращающегося момента сил F диполь молекулы аммиака поворачивается и устанавливается так, что электрический момент параллелен вектору E . При этом M и равнодействующая электрических сил равны нулю, энергия диполя минимальна. Диполь занял устойчивое равновесие и удерживается в электрическом поле волны ($\alpha = 0$). При $\alpha = \pi$, энергия диполя максимальна, а вращающийся момент равен нулю. Диполь находится в состоянии неустойчивого равновесия. Равнодействующая электрических сил $F_{\text{рав}}$ определяется величиной дипольного момента $M_{\text{ам}}$ и градиентом напряжённости

электрического поля на единице длины диполя, то есть:

$$F_{\text{рав}} = M_{\text{ам}} \frac{\Delta E}{\Delta l}, \quad (30)$$

где l – длина диполя.

Под действием $F_{\text{рав}}$ диполь молекулы аммиака втягивается в электрическое поле волны и удерживается в нем.

При отсутствии внешнего электрического поля дипольные моменты молекул водяного пара $M_{\text{вп}}$ и аммиака $M_{\text{ам}}$ ориентированы в пространстве беспорядочно, а вектор поляризации объема атмосферы равен нулю. При облучении данного объема атмосферы электро-

магнитной волной возникает ориентационная поляризуемость за счет момента сил, действующих на диполь во внешнем электрическом поле. Под действием момента сил полярные молекулы поворачиваются таким образом, чтобы их дипольные моменты были ориентированы вдоль электрических силовых линий внешнего электрического поля.

Тогда вектор поляризации α единичного объема атмосферы запишется в виде:

$$\alpha = \frac{N_{\text{вп}} M_{\text{вп}} + N_{\text{ам}} M_{\text{ам}}}{V}. \quad (31)$$

Степень ориентированности полярных молекул аммиака в электрическом поле электромагнитной волны, излучаемой антенной МРЛ, определяется как напряженностью электрического поля, так и температурой аммиачного облака. Причем тепловое движение разрушает дипольную ориентацию молекул аммиака вдоль силовых линий поля, а величина напряженности электрического поля увеличивает их степень ориентированности в электрическом поле волны.

При движении аммиачного облака поперек магнитных силовых линий электромагнитной волны с напряженностью H , в объеме аммиака наводится ЭДС индукции:

$$\mathcal{E} = V \cdot H \cdot l, \quad (32)$$

где V – скорость движения аммиачного облака; H – напряженность магнитного поля; l – длина аммиачного облака по лучу радиолокатора.

Индукцированный полем, ток вызывает силу взаимодействия, которая препятствует выходу молекул аммиака из радиолокационного объема аммиачного облака.

Основываясь на материалах из Википедии, растворимость аммиака в воде чрезвычайно велика. В объеме воды при температуре 0°C растворяется 1200 объемов аммиака, а при температуре 20°C – 700 объемов. Благодаря тому, что не связывающее двухэлектронное облако строго ориентировано в пространстве, молекула аммиака обладает высокой полярностью и хорошей растворимостью в воде.

С учетом хорошей растворимости аммиака в воде, а также наличия в санитарно-защитной зоне Одесского припортового завода больших водных площадей, имеется возможность создать дистанционную метеорологическую систему мониторинга аварийных выбросов аммиака и их нейтрализацию с целью защиты населения города от его физиологического воздействия.

Радиолокационная система включает метеорологический радиолокационный поляриметр и устройство компьютерной обработки, представления и передачи радиолокационной информации в соответствующие центры, специализированные рабочие компьютерные потребители информации, работающие в среде Windows 95/98/2000.

МРЛ обеспечивает круглосуточное наблюдение состояния атмосферного воздуха с автоматическим обнаружением аварийных выбросов аммиака в атмосферу в радиусе обнаружения, измерение его концентрации и координат переноса (азимута, высоты и скорости) циклами по пять минут.

Информация получается при круговом обзоре на трех углах $(0^\circ; 0,5^\circ; 1,5^\circ)$ в радиусе 20 км в декартовых координатах в квадратах сетки 2×2 км (четыре цикла по 5 минут в течении часа).

Специальное программное обеспечение на компьютере МРЛ работает в операционной системе реального времени и решает следующие задачи:

- управление антенной МРЛ;
- контроль над режимом работы всех систем;
- аналого-цифровое преобразование, ввод измерительной радиолокационной информации;

- удаление местников;
- коррекцию сигнала на расстояние;
- перевод разности фаз в концентрацию аммиака;
- передачу радиолокационной информации потребителям (областная, городская и районные администрации, областное управление по чрезвычайным ситуациям).

Специальное программное обеспечение является типовым и реализовано в виде компонента 32-разрядных приложений, работающих под управлением ОС Windows NT 4.0 или в среде Windows 95/98/2000. Информация с АМПК может передаваться в названные организации в коде BUFR или кода RADOB. Автоматизированная радиолокационная система комплектуется метеопостом «Атмосфера-10», метеоданные которого используются в центральной компьютерной системе МРЛ для прогнозирования состояния атмосферного воздуха с аммиаком.

АРС выполняет две основные функции:

1. Обнаружение зоны аммиака в атмосферном воздухе, измерение ее координат и концентрации аммиака, прогноз развития опасной аммиачной зоны и передачи всей информации по каналам связи включая и Интернет потребителей.

Радиолокационная информация о состоянии атмосферы основана на использовании круговой поляризации электромагнитной волны правого и левого направления вращения. Причем ортогональная составляющая эхо-сигнала будет иметь больший коэффициент поглощения j , дБ/км, чем параллельная. При показателе преломления n , близком к единице, ортогональная составляющая имеет минимальную амплитуду.

При наличии продольного магнитного поля коэффициент поглощения j имеет различную величину для электромагнитной волны правого и левого направлений вращения вектора.

Скорость распространения электромагнитной волны правого и левого направлений вращения определяется значением комплексного показателя преломления m атмосферы с аммиаком, то есть:

$$m = n - jP, \quad (33)$$

где n – действительная часть комплексного показателя преломления, а мнимая часть p – показатель поглощения.

Сдвиг фаз между электрическими составляющими правого и левого направлений вращения и магнитной составляющей определяется из условия:

$$\Delta\Phi = \arctg \frac{P_{\Sigma}}{n_{\Sigma}}, \quad (34)$$

где $P_{\Sigma} = P_{\text{пр}} + P_{\text{лев}}$, $n_{\Sigma} = n_{\text{пр}} + n_{\text{лев}}$.

Тогда значение магнитной составляющей эхо-сигнала определяется из соотношения:

$$H = \frac{\sqrt{n_{\Sigma}^2 + P_{\Sigma}^2}}{z_0} I, \quad (35)$$

где I – первый параметр Стокса, равный

$$I = E_{\text{пр}}^2 + E_{\text{лев}}^2, \quad (36)$$

z_0 – волновое сопротивление атмосферы. Параметр I позволяет обнаружить аммиак в атмосфере, разность фаз позволяет измерить концентрацию аммиака, а значение магнитной составляющей дает информацию о состоянии атмосферы с аммиаком.

2. Электромагнитное воздействие на обнаруженную зону аммиака высокопотенциальной электромагнитной энергией с целью уменьшения опасной концентрации.

В табл. 1 приведены технические характеристики МРЛ.

Таблица 1 – Технические характеристики МРЛ.

Технические характеристики	Единицы измерения	Пределы измерения
Продолжительность цикла обзора пространства	мин	5
Скорость вращения антенны в горизонтальной плоскости	об/мин	$6 \pm 0,5$
Излучаемая мощность в импульсе	кВт	200 1000
Длительность излучаемых импульсов	мкс	2
Поляризация измеряемых импульсов	град	круговая
Частота следований импульсов	Гц	600
Частота передатчика	МГц	9990
Чувствительность приемного устройства	дБ, мВт	-132
Промежуточная частота:		
– первая	МГц	30
– вторая	МГц	4
Усилители линейные с динамическим диапазоном	дБ	90

Упрощенная структурная схема построения МРЛ показана на рис. 2.

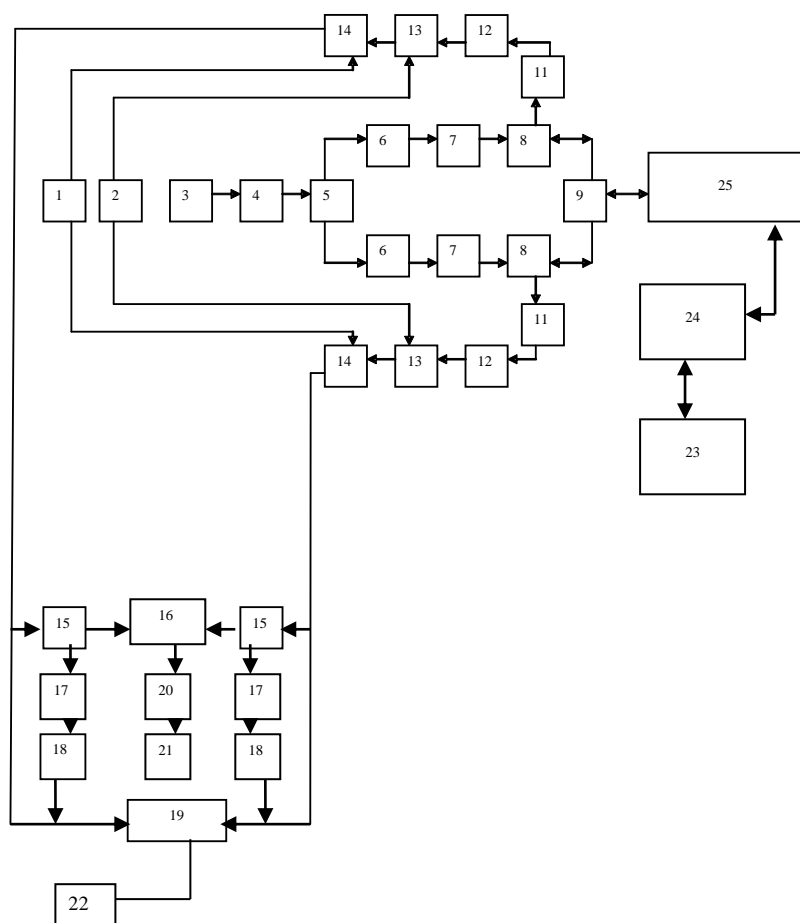


Рисунок 2 – Упрощенная структурная схема построения МРЛ: 1, 2 – гетеродин первой и второй промежуточной частоты; 3 – передатчик; 4 – модулятор; 5 – делитель мощности; 6 – аттенюатор; 7 – фазовращатели; 8 – антенный переключатель; 9 – поляризационный селектор; 10 – антенная система; 11 – газовые разрядники; 12 – усилители высокой частоты; 13 – смесители первой промежуточной частоты; 14 – смесители второй промежуточной частоты; 15 – усилители второй промежуточной частоты; 16 – устройства для измерения третьего, четвертого параметров Стокса и разницы фаз; 17 – амплитудные детекторы; 18 – усилители низкой частоты; 19 – устройство для измерения первого и второго параметров Стокса; 20 – устройство для измерения разности фаз; 21 – дисплей компьютера МРЛС; 22 – индикатор МРЛС; 23 – процессор управления МРЛС; 24 – блок управления антенной; 25 – антенная система.

Исходя из того, что в объеме атмосферы с аммиаком с определенной напряженностью электрического поля, создаваемого излучаемой МРЛ электромагнитной волной круговой поляризации, тензоры электрической и магнитной проводимости являются функциями пространственных координат и времени, и в совокупности соответствуют электродинамическим параметрам данного объема атмосферы. Реальными источниками электромагнитного поля в

аммиачном объеме атмосферы можно считать также электрические и магнитные токи, связанные с круговой поляризацией облучаемой данным объемом атмосферы электромагнитной волны, а также токи поляризации.

Под воздействием высокопотенциального электрического поля круговой поляризации и благодаря высокой полярности молекул аммиака, дипольное аммиачное облако будет вращаться с частотой вращения электрического вектора в радиолокационном объеме атмосферного воздуха с аммиаком, ограниченном пространственной протяженностью импульса и шириной диаграммы направленности антенны поляризационной МРЛ.

Для вращения дипольного аммиачного облака может быть использован прямоугольный рупор в качестве излучателя электромагнитной волны, так как он позволяет получить симметричную диаграмму направленности антенны. Диаграмму излучения прямоугольного рупора можно представить в виде двух уравнений [5]:

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta} &= F(\theta, \varphi) \left[1 + \frac{\lambda_c}{\lambda_b} \cos \theta \right] \sin \varphi \\ E_{\varphi} &= F(\theta, \varphi) \left[\frac{\lambda_c}{\lambda_b} + \cos \theta \right] \cos \varphi \end{aligned} \right\}, \quad (37)$$

где λ_c и λ_b – длина волны в свободном пространстве и в волноводе.

При $\frac{\lambda_c}{\lambda_b} \approx 1$, паразитная компонента E_y в раскрыве зеркала будет отсутствовать. Кроме

того, если отношение широкого и узкого размеров рупора $\frac{a}{b} = 1,4$, облучение в E и H плоскостях будут одинаковыми. Вращение аммиачного облака можно при этом осуществить вращением рупора с помощью специального вращающегося сочленения.

При достаточной плотности электромагнитного поля, облучающего аммиачный объем атмосферы, большая часть молекулярных диполей, имеющих ориентацию параллельно полю, оказываются в возбужденном состоянии, в то время как еще ортогонально ориентированные диполи не возбуждены. Это создает анизотропию пространственного распределения возбужденных диполей, которые формируют эхо-сигнал, дающий возможность обнаружить с помощью поляризационной МРЛ аммиачное облако и измерить его координаты. Второй причиной возникновения анизотропии в аммиачном облаке является деформация электронного облака под действием сильного электрического поля электромагнитной волны. Третьей причиной анизотропного изменения характеристик аммиачной среды является электрокалорический эффект, связанный с нагреванием среды в процессе распространения поляризованной электромагнитной волны. Электронный эффект развивается за $10^{-12} - 10^{-14}$ с, ориентационный за $10^{-11} - 10^{-12}$ с и электрокалорический за 1 с [6, 7]. Общим у всех этих процессов является отображение поляризационных характеристик электромагнитной волны в материальной среде за счет изменения комплексной диэлектрической проницаемости среды с аммиаком.

Так как антенна поляризационной МРЛ может излучать электромагнитную волну любой поляризации, то приведенные рассуждения справедливы и для волны эллиптической поляризации.

При облучении аммиачного объема атмосферы вдоль оси Z декартовой системы координат эллиптически поляризованной волной (рис. 3), для всех трех сечений среды тензор диэлектрической проницаемости запишется в известном виде суммой симметрической (скалярной) и несимметрической (анизотропной) частей:

$$\left| \begin{array}{cc} \varepsilon'_i & 0 \\ 0 & \varepsilon'_j \end{array} \right| = \frac{\varepsilon'_i + \varepsilon'_j}{2} \left| \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} \right| + \frac{\varepsilon'_i - \varepsilon'_j}{2} \left| \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{array} \right|, \quad (38)$$

где $i, j = x, y, z; i \neq j_0$

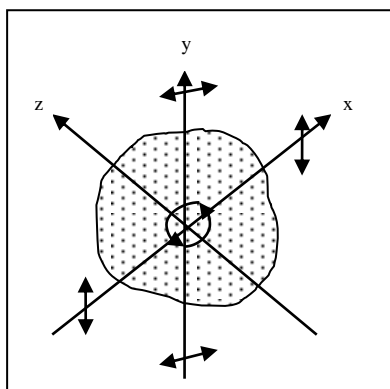


Рисунок 3 – Векторное воздействие эллиптически поляризованной волны в трех сечениях поляризационно-чувствительной аммиачной среды

Тензор диэлектрической проницаемости облучаемого аммиачного объема атмосферы по аналогии с формулой Лоренца для анизотропной среды можно записать в виде:

$$\frac{\varepsilon_i - 1}{\langle n \rangle + 2} = \frac{4\pi}{3} N\alpha_i, \quad (39)$$

где ε_i – компонент тензора диэлектрической проницаемости;

$\langle n \rangle = \frac{1}{3}(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$ – главные показатели преломления анизотропного аммиачного объема;

N – число молекул аммиака в единице объема;

α_i – компонент молекулярной поляризуемости.

Сила взаимодействия между диполями аммиака зависит как от расстояния между ними, так и от взаимной ориентации. Поэтому дипольный объем атмосферы, состоящий из ассиметрично расположенных зарядов, алгебраическая сумма которых равна нулю, можно рассматривать как объемный диполь. Электрическое поле электромагнитной волны является носителем электрической энергии, которая в объеме атмосферы с аммиаком имеет плотность, определяемую известным соотношением:

$$\omega_y = \frac{\Delta W_e}{\Delta V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}, \quad (40)$$

Объемная плотность энергии магнитного поля в аммиачном объеме атмосферы определяется из условия [2]

$$\omega_m = \frac{\Delta W_m}{\Delta V} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}. \quad (41)$$

На электрические заряды в электромагнитном поле волны аммиачного объема атмосферы с суммарной плотностью энергии электрического и магнитного полями:

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}, \quad (42)$$

где $\mu_0 = 1/c^2\varepsilon_0$ действует обобщенная сила Лоренца, состоящая из векторной суммы электрической и магнитной составляющих, то есть:

$$F_{об.л.} = F_y + F_m = q(E + K_0 \nu B \sin \alpha), \quad (43)$$

где α – угол между вектором скорости ν движения заряда q и вектором магнитной индукции B ; K_0 – единичный вектор, модуль которого $|K_0| = 1$.

Так как магнитное поле электромагнитной волны круговой поляризации можно считать однородным, то траектория движения молекулы представляет собой окружность, радиус которой определяется из условия:

$$r = \frac{m_0 \nu}{qB \sqrt{1 - \nu^2 / c^2}}, \quad (44)$$

где m_0 – масса молекулы аммиака.

Из (40) видно, что траекторией движения молекул аммиака в электромагнитном поле волны, излучаемой антенной метеорологического поляриметра является окружность.

Период обращения молекулы аммиака по окружности вычисляется по формуле:

$$T = \frac{2\pi m_0}{qB\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (45)$$

Электромагнитное поле волны, излучаемой антенной метеорологического поляриметра, удерживает в пределах ширины диаграммы направленности антенны дипольное облако аммиака. Изменяя угол места антенны с учетом наличия лиманов и акватории Черного моря до -1° , вращающийся объем дипольных молекул аммиака будет взаимодействовать с водой, образуя аммиачную воду, так как растворимость NH_3 в воде около 1200 объемов при $0^\circ C$ и 700 объемов при $20^\circ C$ в объеме воды.

Выводы

1. Обоснована возможность дистанционного радиолокационного обнаружения аварийных выбросов аммиака в атмосферу и измерения его концентрации с использованием радиолокационного метеорологического поляриметра.
2. Показана возможность дистанционного уменьшения физиологического действия газообразного, находящегося в атмосфере аммиака, путем растворения его в воде.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04. 320–91. – Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 1993. – 356 с.
2. Довиак Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Р. Довиак, Д. Зрнич – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 511 с.
3. Яворский Б.М. Основы физики. – Том 1; Наука 2-я глава редакции физико-математической литературы / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. – М.– 1974. – 495 с.
4. Bean B. R. Radio Meteorology, Natl, Bur, Stadt., Monogr, 92, Supt, Doc. U. S. Govt. Printing Office, Washington, D.C., 1996. – P: 175–186.
5. Билетов М. В. Радиометеорология / М.В. Билетов, В.П. Кузьменко, Н.Ф. Павлов, Н.В. Цивенко. – М.: Военное издательство, 1984. – 208 с.
6. Фельда Я.Н. Антенны сантиметровых волн / Я.Н. Фельда. – М.: Сов. радио, 1950. – С. 25–40.
7. Вукс М.Ф. Определение оптической анизотропии молекул ароматических соединений из двойного лучепреломления кристаллов / М.Ф. Вукс / Оптика и спектр. – 1996. –Т.1. – № 4. – 644–651 с.

REFERENCES

1. Guidelines for the production and use of observational data from non-automated radar MRL-1, MRL-2, MRL-5. RD 52.04. 320-9, (1993): 356.
2. Doviak, P. "Doppler radar and meteorological observations" (1988): 511.
3. Jaworski, B.M. "Fundamentals of Physics" Publisher "Science" 2 head version of physical and mathematical literature" Volume 1 (1974): 495.
4. Bean, B.R. "Radio Meteorology", (1996): 175-186.
5. Biletov, M.V. "Radiometeorology" (1984): 208.
6. Felda, Y.N. "Feld Antennas centimeter waves edited" (1950): 25–40.
7. Vuks, M.F. "Determination of the optical anisotropy of the molecules of aromatic compounds of the birefringent crystals" Volume 1, number 4, (1996): 644-651.