СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

И.Б. Широков¹, П.А. Евдокимов^{2,1}, Е.И. Широкова¹¹Севастопольский государственный университет, РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33²Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: shirokov@ieee.org, evdokimov@ieee.org, shirokova@ieee.org

В статье рассмотрен новый подход к мониторингу воздушной среды, основанный на фазометрических измерениях в СВЧ-диапазоне и гомодинном преобразовании частоты. Информацию об изменении состава воздуха получают путем определения набега фазы микроволнового сигнала при его прохождении исследуемой среды. При этом для определения изменения содержания в воздушной смеси исключительно вредоносных газов из информационного сигнала вычитают метеорологическую составляющую среды. Реализация метода предполагает организацию системы мониторинга, состоящей из нескольких микроволновых измерительных линий, синхронизированных с единым центром мониторинга по УКВ-каналу связи, которая позволит осуществлять глобальный и непрерывный контроль изменения состава воздушной среды. Приведены структурные схемы системы и отдельных её блоков, рассмотрены теоретические возможности их работы. Также проведено экспериментальное исследование влияния метеорологических характеристик окружающей среды на набег фазы микроволнового сигнала.

Ключевые слова: микроволновые колебания, фазометрические измерения, набег фазы, диэлектрическая проницаемость, гомодинное преобразование, воздушная среда, метеорологические характеристики.

Поступила в редакцию: 14.12.2020. После доработки: 20.02.2021.

Введение. В настоящее время во многих индустриально развитых странах одной из актуальных задач является сохранение окружающей среды. При этом самой глобальной остаётся проблема загрязнения воздуха, вызванная техногенными факторами, такими как, например, выбросы или утечки вредоносных газов в воздух. В результате воздействия загрязнения воздуха на здоровье человека продолжительность жизни населения Европы в среднем уменьшается на 8.6 [1] месяцев, при этом в 25 европейских государствах в общей сложности отмечается около 348 000 случаев преждевременной смерти [1].

Таким образом, существует необходимость контроля изменения состава воздушной среды, а также соответствующего информирования и предупреждения населения о возможной опасности для здоровья. Следовательно, роль эффективной системы мониторинга состава воздуха является очевидной и весьма важной.

На сегодняшний день известно множество способов определения изменения содержания вредоносных газов в воздухе, таких как, например, оптические, массово-весовые и ультразвуковые [2–4]. Однако перечисленные методы и соответственно устройства на их основе обладают недостатками, которые не позволяют организовать высокоэффективный мониторинг контролируемой среды. К недостаткам можно отнести слабую защищённость датчиков от внешнего воздействия, длительное время установления показаний и возможность проведения только локального контроля воздушной среды. В особо загрязнённых зонах городской местности, таких как местность вблизи автомагистралей, где вследствие различной интенсивности транспортного потока выхлопные газы в объеме распределены неравномерно, устройства на основе перечисленных методов не могут оперативно регистрировать изменения состава воздуха.

Таким образом, проблема мониторинга воздуха требует нового подхода к решению.

Новый подход к мониторингу воздуха. В качестве решения предлагается использование системы контроля изменения состава воздушной среды, основанной на фазометрических измерениях в СВЧ-диапазоне и гомодинном методе преобразования частоты [5, 6]. Суть метода заключается в том, что по изменению набега фазы микроволнового сигнала при его двукратном прохождении исследуемой воздушной среды с учётом погодных условий и, зная длину контролируемой трассы, определяют изменения диэлектрической проницаемости среды и соответственно изменения состава воздуха [7].

При этом данный метод не позволяет идентифицировать газ в воздухе, концентрация которого изменилась. Однако любые отклонения от состава «чистой» атмосферы оказывают неблагоприятное воздействие на здоровье человека. Например, при увеличении объемной доли углекислого газа в воздухе до 0,1% у человека сужаются бронхи, и возникает ощущение духоты, слабости и головной боли [8]. Таким образом, своевременное обнаружение изменения состава воздушной смеси при помощи описываемого метода позволит предотвратить отравление газами и образование хронических заболеваний из-за токсичной воздушной среды.

Разработанная система контроля состава воздушной среды состоит из блока управления и n -го числа пар измерительных блоков. Общая схема системы показана на рис. 1.

Рис. 1. Общая схема разработанной системы
Fig. 1. General scheme of the developed system

При этом каждая пара измерительных блоков состоит из измерительной станции и блока ретранслятора, синхронизированных по УКВ каналу связи с блоком управления (рис. 2).

Рис. 2. Взаимодействие одной пары измерительных блоков и блока управления
Fig. 2. Interaction of one pair of measuring units and a control unit

Механизм определения изменения содержания вредных газов в воздухе и обмена данными между одной парой измерительных блоков и блоком управления показан на рис. 3.

Принцип работы системы следующий.

Микроволновые колебания с начальной амплитудой U_1 , частотой f_1 и начальной фазой φ_1 , описываемые следующим выражением:

$$u_1(t) = U_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad (1)$$

первоначально генерируют микроволновым генератором (МГ) в измерительной станции первой пары измерительных блоков и через микроволновый Y-циркулятор подают на микроволновую антенну первичного излучения и вторичного приема (A1), с помощью которой первично излучают эти микроволновые колебания в направлении микроволновой антенны первичного приема и вторичного излучения (A2), входящей в состав блока ретранслятора.

В точке приема микроволновый сигнал приобретает набег фазы $\Delta\varphi$ равный:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi f_1 d \sqrt{\varepsilon}}{c}, \quad (2)$$

где d – длина измерительной трассы, ε – относительная диэлектрическая проницаемость исследуемой газовой среды (воздуха), c – скорость света в вакууме.

Рис. 3. Структурная схема основных блоков системы
Fig. 3. Structural scheme of the main units of the system

Таким образом, первично принятые микроволновые колебания на входе ретранслятора имеют вид:

$$u_2(t) = U_2 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1 + \Delta\varphi), \quad (3)$$

где U_2 – амплитуда принятых микроволновых колебаний.

Принятые микроволновые колебания через микроволновый Y-циркулятор ретранслятора подают на вход микроволнового полосно-пропускающего фильтра (ППФ 1), настроенного на частоту f_1 .

С выхода микроволнового полосно-пропускающего фильтра (ППФ 1) сигнал подают на вход микроволнового усилителя (МВУ), с помощью которого микроволновый сигнал усиливают для увеличения дальности работы системы.

Далее усиленный микроволновый сигнал подают на сигнальный вход управляемого микроволнового фазовращателя (УФВ), на управляющий вход которого через низкочастотный полосно-пропускающий фильтр (ППФ 2) подают синхронизирующий сигнал с частотой

F_1 , полученный УКВ приёмником с антенной (УКВ 2.1). В управляемом микроволновом фазовращателе (УФВ) микроволновые колебания с частотой f_1 получают периодический (с периодом T_1) монотонно нарастающий от 0 до 2π (или убывающий) фазовый сдвиг. В этом случае можно говорить о сдвиге спектра микроволновых колебаний на, так называемую, частоту Доплера $F_1 = 1/T_1$. Таким образом, осуществляют сдвиг частоты микроволнового сигнала с частотой f_1 на величину, равную частоте F_1 в ту или другую сторону, в зависимости от монотонного нарастания или монотонного убывания вносимого фазового сдвига.

Трансформированный по частоте микроволновый сигнал с частотой $f_2 = f_1 \pm F_1$ имеет следующий вид:

$$u_3(t) = U_3 \cos[2\pi(f_1 \pm F_1)t + \varphi_1 \pm \varphi_{CR} + \Delta\varphi], \quad (4)$$

где U_3 – амплитуда микроволнового сигнала с учетом усиления в микроволновом усилителе и ослабления в микроволновом полосно-пропускающем фильтре и управляемом фазовращателе, φ_{CR} – начальная фаза синхронизирующего сигнала с частотой F_1 .

Этот сигнал через микроволновый Y-циркулятор подают на микроволновую антенну первичного приема и вторичного излучения (А2), с помощью которой его вторично излучают в направлении микроволновой антенны первичного излучения и вторичного приема (А1) измерительной станции. При этом микроволновый сигнал приобретает набег фазы равный:

$$\Delta\varphi' = \frac{2\pi f_2 d \sqrt{\varepsilon}}{c}.$$

Так как частота F_1 низкочастотного опорного сигнала много меньше частоты f_1 микроволнового измерительного сигнала, то $f_2 = f_1 \pm F_1 \approx f_1$. Следовательно, набег фазы микроволнового сигнала с частотой f_2 приближенно равен:

$$\Delta\varphi' \approx \frac{2\pi f_1 d \sqrt{\varepsilon}}{c} = \Delta\varphi.$$

В измерительной станции вторично принятые микроволновые колебания через Y-циркулятор подают на один вход смесителя (СМ), на другой вход которого подают исходные микроволновые колебания с частотой f_1 . В смесителе осуществляют гомодинное преобразование частоты.

Преобразованный по частоте низкочастотный сигнал описывается следующим выражением:

$$u_4(t) = U_4 \cos(2\pi F_1 t \pm \varphi_{CR} + 2\Delta\varphi), \quad (5)$$

где U_4 – амплитуда низкочастотного сигнала на выходе смесителя.

Видно, что этот сигнал не содержит начальной частоты и фазы исходного микроволнового сигнала, но содержит

набег фазы микроволнового сигнала, возникающий в результате его двойного распространения по открытой трассе.

Полученный сигнал усиливают и ограничивают по амплитуде в избирательном усилителе-ограничителе (УО).

Дополнительно в блоке управления с помощью кварцевого опорного генератора (ОГ) формируют синхронизирующий сигнал с амплитудой U_5 , частотой F_1 и начальной фазой φ_{CR} , описываемый следующим выражением:

$$u_5(t) = U_5 \cos(2\pi F_1 t + \varphi_{CR}). \quad (6)$$

Этот сигнал подают на один вход сумматора (СУМ), на другой вход которого подают субтоновый сигнал, который формируют в блоке управления при помощи генератора субтоновой частоты (СУБГ). Субтоновый сигнал имеет вид:

$$u_6(t) = U_6 \cos(2\pi F_{ST} t + \varphi_{ST}), \quad (7)$$

где U_6 – амплитуда субтонового сигнала; F_{ST} – частота сигнала генератора колебаний субтоновой частоты; φ_{ST} – начальная фаза сигнала генератора колебаний субтоновой частоты.

Таким образом, в результате аддитивного сложения сигналов на выходе сумматора (СУМ) результирующий сигнал будет иметь вид:

$$u_7(t) = U_5 \cos(2\pi F_1 t + \varphi_{CR}) + U_6 \cos(2\pi F_{ST} t + \varphi_{ST}). \quad (8)$$

Данный суммарный сигнал подают на вход модуляции УКВ передатчика (УКВ 1.1), где осуществляют модулирование сигнала несущей частоты f_3 , причем вид модуляции не имеет значения. С помощью антенны УКВ передатчика излучают модулированный сигнал синхронизации и управления в направлении антенн УКВ приемников всех измерительных станций и всех ретрансляторов.

В измерительной станции при помощи антенны УКВ приёмника (УКВ 2.2) принимают модулированный сигнал

синхронизации и управления, где его демодулируют и подают далее на входы двух фильтров: низкочастотного полосно-пропускающего фильтра сигнала синхронизации (ППФ 3) и низкочастотного полосно-пропускающего фильтра сигнала управления (ППФ 4). Низкочастотный полосно-пропускающий фильтр (ППФ 3) настраивают на частоту F_1 синхронизирующего сигнала.

Таким образом, на выходе полосно-пропускающего фильтра (ППФ 3) получают синхронизирующий сигнал, который подают на опорный вход фазового детектора (ФД), на сигнальный вход которого подают сигнал с выхода избирательного усилителя-ограничителя (УО).

В результате, на выходе фазового детектора (ФД) получают сигнал пропорциональный разности аргументов сигналов

$$u_g(t) = K[2\pi F_1 t + 2\Delta\varphi + \varphi_{CR} - 2\pi F_1 t - \varphi_{CR}] = K2\Delta\varphi, \quad (9)$$

где K – коэффициент преобразования фазового детектора.

В результате сигнал на выходе фазового детектора пропорционален исключительно набегу фазы микроволнового сигнала при его двукратном прохождении измерительной трассы.

Зная длину измерительной трассы d , контролируют изменения интегральной относительной диэлектрической проницаемости ε исследуемой газовой среды. Однако этот сигнал пропорционален изменению не только содержания в воздухе вредоносных газов, но и влажности воздуха, которая связана с его температурой.

Для решения этой проблемы в измерительной станции сигнал с выхода фазового детектора сначала подают на вход решающего блока (РБ), на другой вход которого подают сигнал, пропорциональный влажности воздуха. Последний получают с выхода измерителя влажности воздуха (ДВ). Одновременно с этим на третий вход решающего блока (РБ) подают сигнал, пропорциональный изменению температуры воздуха, который

получают на выходе измерителя температуры воздуха (ДТ).

Измерения метеорологических характеристик исследуемой среды проводят в точке размещения измерительной станции. Причем, так как, длина измерительной трассы d не более 200 м, то локальный характер измерений параметров окружающей среды является вполне допустимым.

В решающем блоке согласно математической модели производят вычитание из сигнала, описываемого выражением 9, значение сигнала с выхода измерителя влажности воздуха с учетом некоторого приведенного коэффициента, значение которого, в свою очередь, определяют по сигналу, снимаемому с выхода измерителя температуры воздуха. При этом значение сигнала с выхода фазового детектора усредняют за время установления показаний метеодатчиков. В результате на выходе решающего блока получают сигнал, пропорциональный изменению содержания вредоносных газов в воздухе, и этот сигнал не зависит от метеорологической составляющей исследуемой среды.

Далее этот сигнал в измерительной станции передают в блок управления. Для этого сигнал с выхода решающего блока подают на вход процессорного блока (ПБ), где его обрабатывают и запоминают в модуле памяти (МП).

Дополнительно в измерительной станции с помощью УКВ приемника (УКВ 2.2.) принимают субтоновый сигнал, который выделяют низкочастотным полосно-пропускающим фильтром (ППФ 4), настроенным на диапазон возможных частот субтонового сигнала. Этот сигнал подают на субтоновый детектор (СУБД), настроенный на определенную частоту F_{ST} , определяющую очередной порядковый номер пары измерительных блоков. При совпадении принятой частоты субтонового сигнала с настроенной частотой детектора с его выхода на вход процессорного блока подают сигнал управления, инициирующий передачу пакета данных в блок управления.

В результате процессорный блок формирует цифровой код, соответствующий изменению состава воздушной среды. Этот код подают на вход модулятора (МОД), где цифровой сигнал преобразуют в модулирующий сигнал и подают на вход модулятора УКВ передатчика (УКВ 1.2) с несущей частотой f_4 и при помощи его антенны излучают в направлении блока управления модулированный информационный сигнал.

В блоке управления при помощи антенны УКВ приёмника (УКВ 2.3) принимают информационный сигнал от измерительной станции и подают на вход демодулятора (ДМ), с выхода которого цифровой сигнал подают на вход главного процессорного блока (ГПБ), после чего полученные данные обрабатывают и подают на устройство вывода (УВ).

Далее в блоке управления главный процессорный блок подает новый сигнал на вход генератора колебаний субтоновой частоты (СУБГ), который задает другую субтоновую частоту F_{ST} , определяющую другую пару измерительных блоков.

Таким образом, делают запрос пакета данных из другой пары измерительных блоков, настроенных на частоту этого субтонового сигнала. После чего повторяют всю процедуру получения искомой информации в другом микроволновом канале и передачу полученной информации в блок управления.

Количество пар измерительных блоков ограничено количеством сигналов субтоновой частоты. Международным стандартом определено 50 субтоновых сигналов из частотного диапазона 67,0...254,1 Гц. Представляется, что такого числа пар измерительных блоков достаточно, чтобы покрыть производственную и транспортную инфраструктуру всего населенного пункта, даже достаточно большого.

Математическая модель определения диэлектрической проницаемости среды с учетом метеорологических условий. Вычислительный алгоритм, используемый в решающих блоках предложенной системы мониторинга, основан на теоретических моделях и по-

ложениях, описанных в [9, 10]. Такая модель расчета учитывает различные параметры окружающей среды.

Относительную диэлектрическую проницаемость контролируемой среды ϵ_M можно записать в виде:

$$\epsilon_M = 1 + \chi_M, \quad (10)$$

где χ_M — электрическая восприимчивость среды.

Рассмотрим воздушную среду, которая не содержит вредоносных газов. В таком случае влажный воздух будет представлять собой смесь «сухого» воздуха и водяного пара. Сухой воздух при давлениях близких к атмосферным можно считать идеальным газом. Также, учитывая, что парциальное давление водяного пара во влажном воздухе невелико, можем считать водяной пар идеальным газом. Следовательно, влажный воздух можно рассматривать, как смесь идеальных газов [11].

Электрическую восприимчивость такой среды можно представить в виде суммы электрической восприимчивости χ_{DG} смеси газов, входящих в состав «сухого воздуха», и электрической восприимчивости χ_{wv} водяного пара:

$$\chi_M = \chi_{DG} + \chi_{wv}, \quad (11)$$

Поляризация молекул «сухих» газов обусловлена смещением зарядов в каждой отдельной молекуле относительно равновесного положения. Поэтому выражение для электрической восприимчивости «сухих газов» имеет вид:

$$\chi_{DG} = N_G \chi'_{DG}, \quad (12)$$

где χ'_{DG} — электрическая восприимчивость одной молекулы газа; N_G — количество молекул газа в 1 м^3 .

При этом, N_G зависит от давления p и температуры T среды следующим соотношением:

$$N_G = \frac{p}{kT}, \quad (13)$$

где k – постоянная Больцмана.

В отличие от молекул «сухого» газа поляризация молекул водяного пара вызвана не только смещением зарядов в молекуле, но и поворотом самой молекулы относительно силовых линий поля. Повышение температуры приводит к увеличению скорости движения молекул и соответственно затрудняет их ориентацию. Таким образом, электрической восприимчивости молекул водяного пара будет зависеть от температуры контролируемой среды согласно выражению:

$$\chi_{wv} = \left(\chi'_{wv} + \frac{\chi_{wv}}{T} \right) N_{wv}, \quad (14)$$

где χ'_{wv} – электрическая восприимчивость одной молекулы водяного пара; N_{wv} – концентрация молекул водяного пара при парциальном давлении p_p .

Концентрация молекул водяного пара определяется следующим соотношением:

$$N_{wv} = \frac{p_p}{kT}. \quad (15)$$

Парциальное давление p_p водяного пара выразим через относительную влажность RH и давление насыщенного пара p_{vp} :

$$p_p = RH \times p_{vp}. \quad (16)$$

Давление насыщенного пара p_{vp} найдем из уравнения Клапейрона-Клаузиуса для процесса испарения:

$$p_{vp} = p_{vp0} \times e^{\frac{\mu L}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}, \quad (17)$$

где p_{vp0} – давление насыщенного пара в Па при температуре T_0 в К; L – удельная теплота парообразования; μ – молярная масса воды; R – газовая постоянная. Примем, что в рабочем диапазоне температур устройства удельная

теплота парообразования L не зависит от температуры.

С учетом выражений (11)–(17) формула для диэлектрической проницаемости «чистого» воздуха при различных метеорологических параметрах окружающей среды будет иметь вид:

$$\varepsilon_M = 1 + \frac{p}{kT} \chi'_{DG} + \frac{p_{vp0} e^{\frac{\mu L}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} RH}{kT} \left(\chi'_{wv} + \frac{\chi_{wv}}{T} \right). \quad (18)$$

Значения χ'_{DG} и χ'_{wv} находятся экспериментально. Используя значения для этих величин из источника [10], выражение (18) можем записать в виде:

$$\varepsilon_M = 1 + \left[\frac{157}{T} \times \left(p + \frac{4800 p_{vp0} e^{\frac{\mu L}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} RH}{T} \right) \right] \times 10^{-8}. \quad (19)$$

В результате получаем диэлектрическую проницаемость ε_M , как функцию, от температуры T в К, давления p в Па и относительной влажности RH .

Таким образом, представляется возможным определения изменения содержания вредоносных газов в воздухе по изменению диэлектрической проницаемости среды:

$$\varepsilon_{HG} = \varepsilon_{\text{exp}} - \varepsilon_M, \quad (20)$$

где ε_{HG} – относительная диэлектрическая проницаемость, которая соответствует изменению содержания вредоносных газов в воздухе; ε_{exp} – относительная диэлектрическая проницаемость, полученная фазометрическим методом измерения.

Экспериментальное исследование влияния метеорологических характе-

ристик окружающей среды на набег фазы микроволнового сигнала. Для исследования влияния метеорологической составляющей на работу измерительных блоков была собрана экспериментальная установка, которая показана на рис. 4.

Рис. 4. Схема экспериментальной установки
Fig. 4. The scheme of experimental installation

Установка состояла из измерительной станции и блока ретранслятора (БР).

В свою очередь, измерительная станция состояла из внешнего микроволнового блока (БВ) и блока обработки (БО).

Ретранслятор представлял собой законченный функциональный блок.

Измерения набег фазы микроволнового сигнала проводились на открытой трассе длиной $d = 150$ м в течение двух суток. Высота первой части измерительной установки (внешний блок) составляла 12 м. Высота второй части (блока ретранслятора и рупорной антенны) составляла 13 м. При этом частота микроволнового измерительного сигнала $f = 9.4$ ГГц, частота сигнала синхронизации $F = 1$ кГц.

Для измерения набег фазы микроволнового сигнала и синхронизации опорных генераторов измерительных блоков использовался единый канал связи по методике, описанной в [7].

Результаты двухдневного эксперимента представлены на рис. 5.

Рис. 5. Двухдневные измерения набег фазы сигнала в зависимости от погодных условий
Fig. 5. Two day's measurements of phase progression in relation to weather conditions

По оси абсцисс всех графиков отложено время в формате чч:мм:сс.

Флуктуации набега фазы микроволнового сигнала, с учетом двойного прохождения измерительной трассы, показаны на рис. 5, а. Фазовые флуктуации показаны в градусах.

Результаты измерений влажности окружающего воздуха в процентах, умноженных на 10, показаны на рис. 5, б.

На рис. 5, в показаны результаты измерений температуры окружающего воздуха в градусах Цельсия.

Анализ графиков показывает, что изменения набега фазы микроволнового сигнала сильно коррелируют с изменениями влажности и температуры исследуемого воздуха. Стоит отметить, что изменения влажности воздуха существенно влияют на электродинамические свойства воздушной среды, так как диэлектрическая проницаемость воды значительно превышает диэлектрическую проницаемость воздуха и отдельных газов в частности. В результате невозмож-

но точно определить изменение содержания вредных газов в окружающем воздухе.

Для более точного определения изменения состава воздуха полученный сигнал подают в расчетный блок, в котором метеорологическая составляющая вычиталась из показаний фазы принятого сигнала. В результате получают сигнал, не зависящий от погодных условий.

Изменения набега фазы до и после вычитания метеорологической составляющей показаны на рис. 6, где по оси ординат показано изменение фазы микроволнового сигнала в градусах при двукратном прохождении измерительной трассы, а по оси абсцисс – время в часах от начала эксперимента.

Плавный характер кривой после вычитания метеорологической составляющей указывает на отсутствие вредных газов в воздухе. При этом небольшие фазовые флуктуации устраняются калибровкой решающего блока измерительной станции.

Рис. 6. Изменение набега фазы сигнала

Fig. 6. Signal phase progression change

Закключение. В статье предложен новый подход к мониторингу воздуха. Метод определения изменения состава воздуха основан на микроволновом фазовом измерении с учетом влияния погодных условий.

Система, основанная на этом способе, позволяет проводить контроль изменения состава воздушной смеси в отдаленных друг от друга областях пространства с последующим объединением в единую сеть мониторинга, что при выбросе или утечке вредоносных газов в воздушную среду позволит осуществить оценочный анализ распространения га-

зов в объеме и установления границ аварийной зоны.

Разработанная система качественно отличается от существующих аналогов в области мониторинга параметров атмосферы, как обладающая малым временем установления показаний и большим контролируемым объемом. В ходе экспериментального исследования было установлено, что после вычитания метеорологической составляющей из информационного сигнала система становится не подверженной влиянию погодных условий.

Рассмотренная в данной статье система контроля изменения состава воздушной среды может быть использована для мониторинга воздуха городских территорий, а также в составе газоаналитических систем на токсичных и взрывоопасных предприятиях.

Исследование проводится при поддержке Фонда содействия инновациям по договору № 595ГУЦЭС8-D3/62032 от 15.10.2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Руководящие принципы разработки национальных стратегий использования мониторинга качества воздуха и воды как средства экологической политики.* Нью-Йорк; Женева. ООН, 2012. 50 с.
2. *Туричин А.М., Аршанский Б.Э., Зограф И.А. Электрические измерения неэлектрических величин / под общ. ред. П.В. Новицкого.* М.: Энергия, 1966. 690 с.
3. *Li C., Yin Z. "Infrared gas sensor,"* Proc. of the Third International Symp. on Electronic Commerce and Security Workshops. Guangzhou, China, 29-31 July 2010, P. 101–104.
4. *He Y., Zhang Y., Kan R., Wang L., You K., and Liu J. "Study on mash gas monitoring with distributed multipoint fiber optic sensors system in coal mine,"* IEEE Proc. of Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO), Shanghai, China, May 2012. P. 21–23.
5. *Shirokov I.B., Ivashina M.V. "Amplitude and Phase Progression Measurements on Microwave Line-of-Sight Links,"* IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'01), Sydney, Australia, 9-13 July 2001, P. 3144–3145.
6. *Shirokov I.B., Shaban S. "Experimental Investigations of Amplitude and Phase Progression Fluctuations on Microwave Line-of-Sight Links,"* IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'02), Toronto, Canada, 24-28 June 2002, Vol. VI, P. 3559–3560.
7. *Широков И. Б., Евдокимов П.А., Широкова Е.И. Способ определения изменения содержания вредоносных газов в воздухе: пат. 2735058, Рос. Федерация. Заявл. 16.06.2020; опубл. 27.10.2020. Бюл. № 30. 9 с.*
8. *Мансуров Р.Ш., Гурин М.А., Рубель Е.В. Влияние концентрации углекислого газа на организм человека // Universum: технические науки: электрон. науч. журн. 2017. № 8 (41).*
9. *Грудинская Г.П. Распространение радиоволн.* М.: Высшая школа, 1975. 280 с.
10. *Киселев В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы).* СПб.: изд-во РГГМУ, 2004. 429 с.
11. *Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. чл.-кор. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина.* М.: МЭИ, 2001. 564 с.

MONITORING SYSTEM OF CHANGES IN AIR COMPOSITION

I.B. Shirokov¹, P.A. Evdokimov^{2,1}, E.I. Shirokova¹

¹Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

²Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The article considers a new approach to air monitoring based on phase-measurement in the SHF range and homodyne frequency conversion. Information about the change in the air composition is obtained by determining the phase progression of the microwave signal when it passes through the environment under study. At the same time, to determine the change in the content of exclusively harmful gases in the air composition, the meteorological component of the environment is subtracted from the information signal. The implementation of the method involves the organization of a monitoring system consisting of several microwave measuring lines synchronized with a monitoring center through a VHF communication channel, which will allow for global and continuous monitoring of changes in the composition of the air environment. The block diagram of the developed system is presented and its individual blocks, the theoretical possibilities of its operation are considered. An experimental study of the influence of meteorological characteristics of the environment on the phase progression of the microwave signal was also carried out

Keywords: microwave oscillations, phase measurements, phase progression, dielectric permittivity, homodyne conversion, air composition, meteorological characteristics.

REFERENCES

1. *Rukovodjashhie principy razrabotki nacional'nyh strategij ispol'zovanija monitoringa kachestva vozduha i vody kak sredstva jekologicheskoy politiki*. N'ju-Jork; Zheneva. OON, 2012. 50 p.
2. *Turichin A.M., Arshanskij B.Je., Zograf I.A.* Jelektricheskie izmerenija neelektricheskikh velichin / pod obshh. red. P.V. Novickogo. M.: Jenergija, 1966. 690 p.
3. *Li C., Yin Z.* "Infrared gas sensor," Proc. of the Third International Symp. on Electronic Commerce and Security Workshops. Guangzhou, China, 29-31 July 2010, pp. 101–104.
4. *He Y., Zhang Y., Kan R., Wang L., You K., and Liu J.* "Study on mash gas monitoring with distributed multipoint fiber optic sensors system in coal mine," IEEE Proc. of Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO), Shanghai, China, May 2012. pp. 21–23.
5. *Shirokov I.B., Ivashina M.V.* "Amplitude and Phase Progression Measure-ments on Microwave Line-of-Sight Links," IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'01), Sydney, Australia, 9-13 July 2001, pp. 3144–3145.
6. *Shirokov I.B., Shaban S.* "Experimental Investigations of Amplitude and Phase Progression Fluctuations on Microwave Line-of-Sight Links," IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'02), Toronto, Canada, 24-28 June 2002, Vol. VI, pp. 3559–3560.
7. *Shirokov I. B., Evdokimov P.A., Shirokova E.I.* Sposob opredelenija izmenenija soderzhaniya vredonosnyh gazov v vozduhe: pat. 2735058, Ros. Federacija. Zajavl. 16.06.2020; opubl. 27.10.2020. Bjul. No 30. 9 p.
8. *Mansurov R.Sh., Gurin M.A., Rubel' E.V.* Vlijanie koncentracii ugle-kislogo gaza na organizm cheloveka. *Universum: tehnicheckie nauki: jelektron. nauch. zhurn.* 2017. No 8 (41).
9. *Grudinskaja G.P.* Rasprostranenie radiovoln. M.: Vysshaja shkola, 1975. 280 p.
10. *Kiselev V.N., Kuznecov A.D.* Metody zondirovanija okruzhajushhej sredy (atmosfera). SPb.: izd-vo RGGMU, 2004. 429 p.
11. *Teoreticheskie osnovy teplotehniki. Teplotehnicheskij jeksperiment: spravocchnik / pod obshh. red. chl.-kor. RAN A.V. Klimenko i prof. V.M. Zorina.* M.: MJeI, 2001. 564 p.