

УДК 621.396.67

Контроль содержания вредоносных газов в воздухе с использованием микроволнового канала связи

Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И.

*Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
shirokov@ieee.org*

Получено: 28 декабря 2020 г.

Отрецензировано: 11 января 2021 г.

Принято к публикации: 15 января 2021 г.

Аннотация: *В работе описан новый метод определения изменения содержания вредоносных газов в воздухе, основанный на применении микроволнового канала связи для проведения фазометрических измерений с учетом метеорологических условий. На основе предложенного метода разработана структурная схема устройства и рассмотрены теоретические возможности его работы. Проведены экспериментальные исследования влияния метеорологических характеристик среды на набег фазы микроволнового сигнала.*

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

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И. Контроль содержания вредоносных газов в воздухе с использованием микроволнового канала связи // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии.* 2020. Т. 3, № 4. С. 389—398.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Широков, И. Б. Контроль содержания вредоносных газов в воздухе с использованием микроволнового канала связи / И. Б. Широков, П. А. Евдокимов, Е. И. Широкова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии.* — 2020. — Т. 3, № 4. — С. 389—398.

Control of harmful gases content in air with the use a microwave communication channel

I. B. Shirokov, P. A. Evdokimov, and E. I. Shirokova
Sevastopol State University
33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053., Russian Federation
shirokov@ieee.org

Received: December 28, 2020

Peer-reviewed: January 11, 2021

Accepted: January 15, 2021

Abstract: *The paper describes a new method for determining the change in the content of harmful gases in the air, based on the use of a microwave communication channel for measuring phase progression considering meteorological conditions. Based on the proposed method, a block diagram of the device is developed and the theoretical possibilities of its operation are considered. Experimental studies of the influence of meteorological characteristics of the environment on the phase progression of the microwave signal are carried out.*

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

For citation (IEEE): I. B. Shirokov et al. "Control of harmful gases content in air with the use a microwave communication channel," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 389–398, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Высокие темпы развития технологий на сегодняшний день связаны с образованием новых предприятий, в том числе и производств с токсичной и вредной средой. При этом технологический прогресс, направленный на улучшение благосостояния общества, усугубляет такие проблемы, как загрязнение окружающей среды и увеличение смертности на рабочих местах. Согласно оценкам Международной организации труда, ежегодно происходит 270 млн. несчастных случаев на работе, из них 350 тыс. со смертельным исходом [1—2]. В частности, производства, предполагающие работу в условиях возможного выброса или утечки газа, составляют примерно 30 % статистических показаний случаев отравления и летального исхода на предприятиях. Также, по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), было выявлено, что около 16 % смертей в мире были вызваны болезнями, связанными с загрязнением окружающей среды.

При этом 92 % населения Земли проживают в районах, где показатели качества воздуха выходят за установленные ВОЗ рамки.

Современные газоанализаторы и системы мониторинга состава воздуха для предотвращения отравления и сигнализации утечки газа эффективны только в 60 % случаев. Такие устройства контроля состава газовой среды основаны на различных методиках измерения, например: оптических, магнитных, массово-весовых, ультразвуковых и химических [3—5].

Причины, по которым невозможно точно и оперативно обнаружить утечку или выброс газа, обусловлены следующими недостатками газоанализаторов: слабая защищенность датчиков от пыли, влаги, паров, длительное время установления показаний, отсутствие у многих приборов функции непрерывного мониторинга и возможность проведения только локального контроля газовой среды.

Таким образом, динамика производственного роста с целью повышения безопасности труда и жизнедеятельности требует новых методов и устройств контроля изменений состава воздушной среды.

2. Новый подход к мониторингу состава воздуха

В качестве нового подхода для решения проблем мониторинга состава воздуха предлагается разработанный метод контроля изменений содержания вредоносных газов в воздухе. Метод основан на фазометрических измерениях в СВЧ диапазоне и гомодинном преобразовании частоты [6—7]. Структурная схема устройства для реализации метода показана на рис. 1 [8]. Принцип работы устройства следующий.

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

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

с выхода генератора микроволновых колебаний (ГМВ) подаются на микроволновый вход амплитудного модулятора (АМ).

На модуляционный вход амплитудного модулятора подаются низкочастотный синхронизирующий сигнал с частотой F_1 , сформированный путем деления частоты сигнала кварцевого опорного генератора (ОГ):

$$u_2(t) = U_2 \cos\left(2\pi \frac{F_{CR}}{n} t + \frac{\varphi_{CR}}{n}\right) = U_2 \cos\left(2\pi F_1 t + \frac{\varphi_{CR}}{n}\right), \quad (2)$$

где F_{CR} — частота сигнала опорного генератора; n — коэффициент деления делителя частоты (D_1); U_2 — амплитуда синхронизирующего сигнала; φ_{CR} — начальная фаза сигнала опорного генератора.

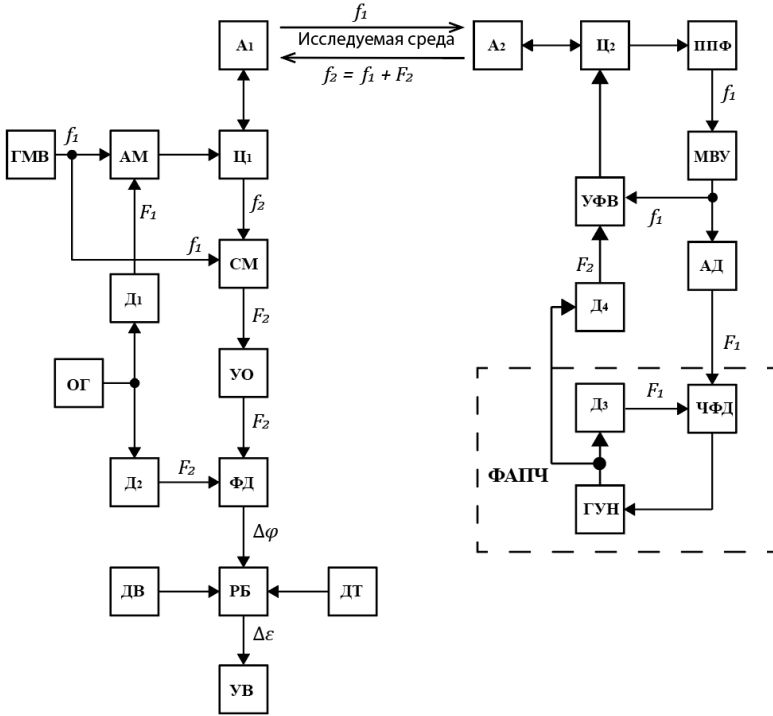


Рис. 1. Структурная схема разработанного устройства.

Fig. 1. The schematic diagram of the developed device

Модулированные микроволновые колебания имеют вид:

$$u_3(t) = U_3 [1 + M \cos(2\pi F_1 t + \varphi_{CR} / n)] \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), \tag{3}$$

где $M = U_2 / U_3$ — коэффициент амплитудной модуляции.

Микроволновый сигнал с выхода модулятора через микроволновый Y-циркулятор (Ц₁), подают на микроволновую антенну измерительной станции (А₁), которая первично излучает эти микроволновые колебания в направлении микроволновой антенны блока ретранслятора (А₂). При этом микроволновый сигнал приобретает набег фазы Δφ равный:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi f_1 d \sqrt{\epsilon}}{c}, \tag{4}$$

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

Принятый в блоке ретранслятора микроволновый сигнал имеет вид:

$$u_4(t) = U_4 \left[1 + M \cos(2\pi F_1 t + \varphi_{CR} / n) \right] \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1 + \Delta\varphi), \quad (5)$$

где U_4 — амплитуда принятых микроволновых колебаний.

В блоке ретранслятора принятые колебания через микроволновый Y-циркулятор (Π_2) подают на вход полосно-пропускающего фильтра (ППФ), настроенного на частоту f_1 , и далее на вход микроволнового усилителя (МВУ). Усиленный сигнал демодулируют при помощи амплитудного детектора (АД). Полученный таким образом низкочастотный сигнал имеет вид:

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

в точности повторяющий по частоте и фазе сигнал (2), значение амплитуды сигнала U_5 непринципиально.

Сигнал с частотой F_1 подают на систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), состоящую из частотно-фазового детектора (ЧФД), опорного генератора, управляемого напряжением (ГУН) и делителя частоты (D_3). Низкочастотный опорный сигнал с частотой F_2 , формируют путем деления частоты сигнала опорного генератора, управляемого напряжением, при помощи делителя частоты (D_4). Полученный сигнал описывается выражением:

$$u_6(t) = U_6 \cos\left(2\pi \frac{F_{CR}}{m} t + \frac{\varphi_{CR}}{m}\right) = U_6 \cos\left(2\pi F_2 t + \frac{\varphi_{CR}}{m}\right), \quad (7)$$

где m — коэффициент деления делителя частоты D_4 , U_6 — амплитуда опорного сигнала.

После этого сигнал (7) подают на управляющий вход управляемого микроволнового фазовращателя (УФВ), на сигнальный вход которого подают колебания с выхода микроволнового усилителя. В фазовращателе в микроволновый сигнал с частотой f_1 вносят периодический монотонно нарастающий от 0 до 2π (или убывающий) фазовый сдвиг с периодом, равным T_2 . При этом можно говорить о сдвиге спектра микроволновых колебаний на частоту Доплера $F_2 = 1/T_2$. Таким образом осуществляют сдвиг частоты микроволнового сигнала с частотой f_1 на величину, равную частоте F_2 . Трансформированный по частоте микроволновый сигнал с частотой $f_2 = f_1 \pm F_2$ имеет следующий вид

$$u_7(t) = U_7 \left[1 + M \cos(2\pi F_1 t + \varphi_{CR} / n) \right] \cos \left[2\pi f_2 t + \varphi_1 + \Delta\varphi \pm \varphi_{CR} / m \right], \quad (8)$$

где U_7 — амплитуда микроволнового сигнала с учетом преобразований.

Сигнал (8) через микроволновый Y-циркулятор (Π_2) подают на микроволновую антенну (A_2), которая вторично излучает этот сигнал в направлении микроволновой антенны (A_1). При этом микроволновый сигнал приобретает набег фазы $\Delta\varphi'$. Так как $F_2 \ll f_1$, то $f_2 = f_1 \pm F_2 \approx f_1$. Следовательно, набег фазы микроволнового сигнала при первом и втором прохождении исследуемой среды будут приблизительно равны $\Delta\varphi' \approx \Delta\varphi$.

Далее принятые микроволновые колебания через микроволновый Y-циркулятор (Π_1) подают на смеситель (СМ), куда также подают исходные микроволновые колебания с частотой f_1 . В смесителе осуществляют гомодинное преобразование частоты. Преобразованный по частоте низкочастотный сигнал описывается следующим выражением:

$$u_8(t) = U_8 \left[1 + M \cos(2\pi F_1 t) \right] \cos(2\pi F_2 t + 2\Delta\varphi + \varphi_{CR} / m), \quad (9)$$

где U_8 — амплитуда низкочастотного сигнала на выходе смесителя.

Этот сигнал усиливают и ограничивают по амплитуде в избирательном усилителе-ограничителе УО, после чего он принимает вид:

$$u_9(t) = U_9 \cos(2\pi F_2 t + 2\Delta\varphi + \varphi_{CR} / m), \quad (10)$$

где U_9 — амплитуда усиленного и ограниченного низкочастотного сигнала.

Этот сигнал подают на вход фазового детектора (ФД), на опорный вход которого подается опорный сигнал с частотой F_2 , полученной путем деления частоты F_{CR} кварцевого опорного генератора (ОГ), сигнал которого описывается следующим выражением:

$$u_{10}(t) = U_{10} \cos \left(2\pi \frac{F_{CR}}{m} t + \frac{\varphi_{CR}}{m} \right) = U_{10} \cos \left(2\pi F_2 t + \frac{\varphi_{CR}}{m} \right), \quad (11)$$

где m — коэффициент деления делителя частоты (D_2).

Таким образом, на выходе фазового детектора (ФД) получают сигнал, пропорциональный разности аргументов сигналов (10) и (11)

$$u_{11}(t) = K \left[2\pi F_2 t + 2\Delta\varphi + \frac{\varphi_{CR}}{m} - 2\pi F_2 t - \frac{\varphi_{CR}}{m} \right] = K 2\Delta\varphi, \quad (12)$$

где K — коэффициент преобразования фазового детектора (ФД). При этом сигнал на выходе фазового детектора пропорционален набегу фазы микроволнового сигнала при его двукратном прохождении измерительной трассы.

После этого сигнал с выхода фазового детектора подают на вход решающего блока (РБ), на второй и третий вход которого подают сигналы, пропорциональные влажности и температуре воздуха. Эти сигналы получают с выходов измерителей влажности (ДВ) и температуры (ДТ). В решающем блоке производят вычитание из сигнала, описываемого выражением (12), значения сигнала с выхода измерителя влажности воздуха с учетом некоторого приведенного коэффициента, который определяется по сигналу с выхода измерителя температуры воздуха. В результате получают сигнал, пропорциональный исключительно изменению содержания вредоносных газов в воздухе.

3. Экспериментальное исследование

По описанной выше структурной схеме была собрана экспериментальная установка (рис. 2) для определения влияния метеорологических характеристик исследуемой среды на изменение фазовых флуктуаций при двукратном прохождении микроволнового сигнала измерительной трассы. Измерения проводились на частоте 9,4 ГГц и трассе прямой видимости протяженностью $d = 150$ м. Установка состояла из измерительной станции и блока ретранслятора (БР). В свою очередь, измерительная станция состояла из внешнего микроволнового блока (ВБ) и блока обработки (БО).

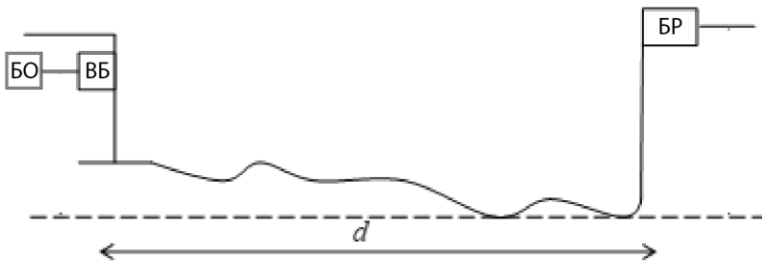


Рис. 2. Схема измерительной трассы.

Fig. 2. The scheme of the measuring link

Синхронно с измерениями набега фазы микроволнового сигнала проводились измерения параметров окружающей среды: влажности и температуры воздуха.

Измерения проводились круглосуточно в течение 10 дней. По оси абсцисс всех графиков откладывалось текущее время в формате чч:мм:сс. На рис. 3.а показаны флуктуации набега фазы микроволнового сигнала, возникающие при его распространении на открытой трассе. Флуктуации

фазы показаны в градусах. На рис. 3.б показаны изменения влажности воздуха, выраженные в процентах. На рис. 3.в показаны изменения температуры воздуха, выраженные в градусах Цельсия.

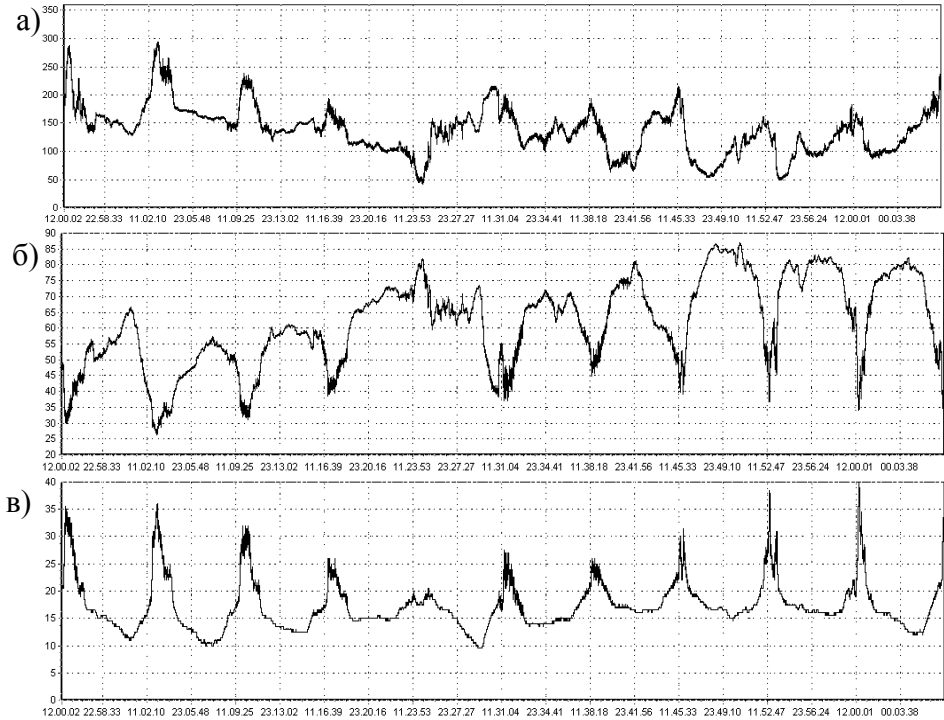


Рис. 3. Десятидневные измерения набега фазы сигнала в зависимости от погодных условий.

Fig. 3. Ten day's measurements of phase progression in relation to weather conditions

Анализ графиков показывает, что изменения набега фазы микроволнового сигнала сильно коррелируют с изменениями влажности и температуры исследуемого воздуха. Для более точного определения изменения состава воздуха полученный сигнал поступал в решающий блок, в котором метеорологическая составляющая вычиталась из показаний фазы принятого сигнала.

Изменения набега фазы до и после вычитания метеорологической составляющей показаны на рис. 4., 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 (не все 10 суток).

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.

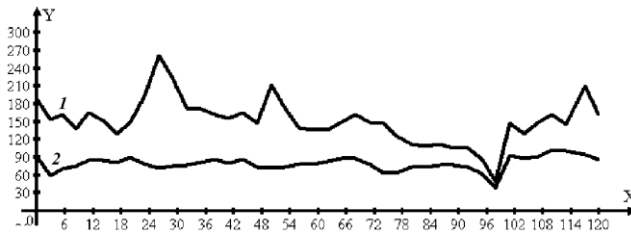


Рис. 4. Изменение набега фазы микроволнового сигнала до (кривая 1) и после (кривая 2) вычитания метеорологической составляющей.

Fig. 4. Change in the phase progression of the microwave signal before (curve 1) and after (curve 2) subtraction of the meteorological component

4. Заключение

В работе описан новый метод мониторинга изменения состава воздушной среды. Суть метода заключается в измерении набега фазы микроволнового сигнала при его двукратном прохождении измерительной трассы для определения изменения диэлектрической проницаемости среды. Для получения объективной оценки изменения содержания вредоносных газов в исследуемом воздухе учитывается влияние погодных условий, а именно изменение влагосодержания и температуры среды. В целях оптимизации радиотракта устройства для измерений и синхронизации опорных генераторов измерительных блоков используется единый микроволновый канал. Устройство на основе рассматриваемого метода качественно отличается от аналогов, присутствующих в настоящее время в области мониторинга газовой среды, обладая высокой скоростью установления показаний и возможностью непрерывного мониторинга состава среды в больших объемах пространства.

Проведено экспериментальное исследование влияния метеорологических характеристик среды на набег фазы микроволнового сигнала. Результаты эксперимента подтвердили теоретические предположения о влиянии паров воды на электродинамические свойства газовой смеси. Следовательно, необходимо учитывать изменения влагосодержания и соответственно температуры среды при проведении фазометрических измерений на открытой трассе.

Стоит отметить, что реализация рассмотренного метода возможна в виде системы мониторинга, состоящей из n -го числа пар измерительных блоков и единого центра мониторинга. Такая система в случае утечки или выброса позволит провести оценочный анализ распространения газа в объеме и определить границы аварийной зоны.

Список литературы

- 1 Липин А. В., Тарасенкова А. С., Помогаев Г. И. Специальная оценка условий труда (СОУТ) в системе трудовых отношений. Москва : Юнитал-М, 2015. 270 с.
- 2 Backhaus C., Mroz A., Willenbrink B. "Coal Mine Gas from Abandoned Mines," Proc. of the IV European Coal Conf., Polish Geological Institute Special Papers, no. 7, 2002, P. 33–40.
- 3 Туричин А. М., Аршанский Б. Э., Зограф И. А. Электрические измерения неэлектрических величин. Москва : Энергия, 1966. 690 с.
- 4 Li C., Yin Z. Infrared gas sensor // Proc. of the Third International Symp. on Electronic Commerce and Security Workshops, Guangzhou, China, July 29–31, 2010. P. 101–104.
- 5 Anderson G. L., Hadden D. M. The gas monitoring handbook. New York : Avocet Press Inc., 1999. 59 p.
- 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, June, 24—28 2002. Vol. VI. P. 3559–3560
- 7 Shirokov I. B., Shaban S., Polivkin S., Sinitsyn D. Theoretical Modeling and Experimental Investigations of Amplitude and Phase Progression Fluctuations on Microwave Line-of-Sight Links in Relation with Natural Medium Conditions // IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'03). Toulouse, France, July 21—25, 2003, Vol. VII. P. 4177–4179.
- 8 Широков И. Б., Широкова Е. И., Евдокимов П. А. Пат. 2735058 (РФ). Способ определения изменения содержания вредоносных газов в воздухе. Оpubл. в Б. И., 2020. № 30.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Евдокимов Павел Алексеевич, студент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Широкова Елена Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Information about the authors

Igor B. Shirokov, Professor of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Pavel A. Evdokimov, student of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Elena I. Shirokova, student of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.