

УДК 538.3

О. А. Бутов

Государственное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118-б

ПЕРЕДАЧА РАДИОСИГНАЛА ПО ТРУБОПРОВОДАМ ГОРОДСКИХ СЕТЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

O. A. Butov

Public institution «Institute of Problems of Artificial intelligence», c. Donetsk
283048, Donetsk, str. Artema, 118-b.

TRANSMISSION OF A RADIO SIGNAL THROUGH PIPELINES OF URBAN WATER SUPPLY NETWORKS

В данной статье исследованы параметры затухания радиосигнала в трубопроводах городских сетей водоснабжения. При применении приведенной методики определены основная волна радиосигнала в трубопроводе и выбрана приемо-передающая антенна бегущей волны, необходимая для ее передачи по данному волноводу.

Ключевые слова: волновод, трубопровод, затухание.

In this article the parameters of radio signal attenuation in the pipelines of urban water supply networks are investigated. In applying the given methodology, the main wave of the radio signal in the pipeline is determined and the receiving and transmitting antenna of the traveling wave, necessary for its transmission along the given waveguide, is selected.

Key words: waveguide, pipeline, attenuation.

Введение

Исследование затухания радиосигнала в трубопроводах городских сетей водоснабжения является актуальной задачей, поскольку в настоящее время имеется потребность в роботах, работающих в таких сетях. Часто такие роботы не имеют иного канала управления, **иначе как по радио**. Для электромагнитных волн водопроводная труба представляет собой круглый волновод. Теория распространения радиоволн в круглом волноводе разносторонне изложена в [1-8] и др. Вместе с тем линии передачи по водопроводным трубам имеют свои особенности, не затронутые в вышеупомянутой литературе. В данной статье исследованы параметры линии передачи радиосигнала при распространении его по трубопроводам городских сетей водоснабжения.

Постановка задачи

Общие требования к линиям передачи в водопроводных сетях:

- 1) минимальное затухание;
- 2) обеспечение передачи заданной мощности без электрических пробоев;
- 3) в рабочей полосе частот линия должна обладать минимальной дисперсией;
- 4) массогабаритные характеристики принимающей и излучающей антенн должны быть минимальными.

В процессе разработки должны быть определены:

1. Тип волны. Передача мощности может производиться вдоль линии передачи с помощью электромагнитного поля определенной конфигурации.
2. Характеристическое сопротивление. Характеристическое сопротивление. Этот параметр типа волны определяется как отношение составляющих вектора

поля \vec{E} и \vec{H} в поперечном сечении линии передачи: $Z_c = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|}$

3. Погонное затухание.
4. Передаваемая мощность.
5. Длина волны, фазовая и групповая скорости, скорость распространения энергии.
6. Дисперсионная характеристика линии передачи.

Имеющиеся сведения о решении проблемы.

Структура поля и другие параметры линии передачи в круглом волноводе достаточно исчерпывающе изложена в [1-8]. В то же время, там везде считается, что потери в стенках волновода и в заполняющей его среде малы или отсутствуют вообще. Это потому, что как правило волноводы изготавливаются из меди и покрываются серебром. В нашем случае волновод железный и к тому же частично заполнен иловыми отложениями. Это значительно влияет на параметры волновода в худшую сторону.

Предлагаемые способы решения проблемы.

Для разрешения проблемы можно предложить 2 способа.

Первый, наиболее простой, заключается в том, что, используя [1-8], можно подставить в модель параметры не нулевого сопротивления стенок и большого тангенса потерь среды, заполняющей волновод.

Второй заключается в решении уравнений максвелла в предположениях не нулевого сопротивления стенок и большого тангенса потерь среды, заполняющей волновод.

Следуя первому способу, получим электрические и магнитные волны в круглом волноводе, в точности, как в [1].

Круглый металлический волновод – это линия передачи в виде стальной трубы круглого поперечного сечения радиуса a . Задача определения поля в круглом волноводе решается в той же общей постановке, что и в прямоугольном волноводе: стенки волновода обладают бесконечной проводимостью, а заполняющая его среда – идеальный диэлектрик с параметрами ε и μ . Волновод бесконечно протяжённый (чисто бегущая волна). Поле монохроматическое. Будем считать, что источник находится за пределами рассматриваемой части линии передачи, и создаваемая им волна распространяется вдоль оси z . Используемая цилиндрическая система координат и радиус a поперечного сечения волновода показаны на рис. 1.

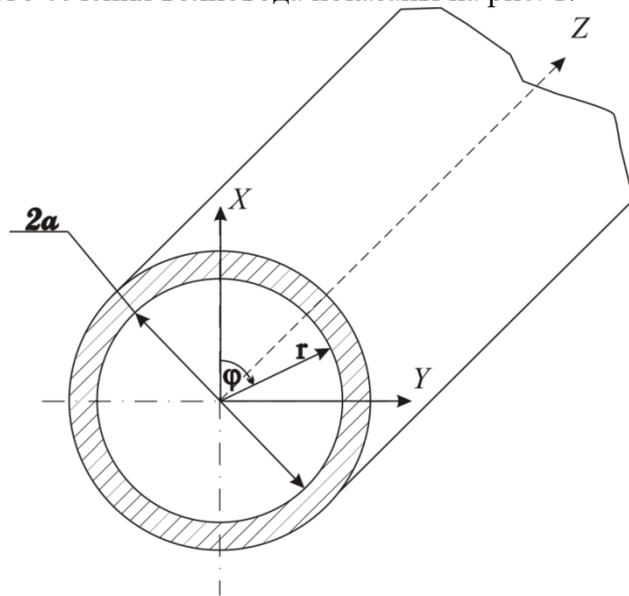


Рисунок 1 – Круглый волновод

Приведем решение [1-6] в конечном виде.

Электромагнитное поле распространяющейся волны E_{mn} имеет компоненты:

$$\begin{aligned} \dot{E}_z &= E_0^{mn} J_m \left(\frac{\xi_{mn} r}{a} \right) \cos m\varphi \cdot e^{-j\beta_{mn} z}, \\ \dot{E}_r &= -jE_0^{mn} \frac{\beta_{mn}}{(\xi_{mn}/a)} J'_m \left(\frac{\xi_{mn} r}{a} \right) \cos m\varphi \cdot e^{-j\beta_{mn} z}, \\ \dot{E}_\varphi &= jE_0^{mn} \frac{\beta_{mn}}{(\xi_{mn}/a)^2} \frac{m}{r} J_m \left(\frac{\xi_{mn} r}{a} \right) \sin m\varphi \cdot e^{-j\beta_{mn} z}, \\ \dot{H}_r &= -\dot{E}_\varphi / Z_E^{mn}, \quad \dot{H}_\varphi = \dot{E}_r / Z_E^{mn}, \quad \dot{H}_z = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $J_m \left(\frac{\xi_{mn} r}{a} \right)$ – функция Бесселя m -го порядка от аргумента $\left(\frac{\xi_{mn} r}{a} \right)$;

a – радиус волновода;

ξ_{mn} – n -й корень функция Бесселя m -го порядка ($n = 1, 2, \dots$);

$J'_{mn}\left(\frac{\xi_{mn}r}{a}\right)$ – первая производная функции Бесселя m -го порядка от аргумента $\left(\frac{\xi_{mn}r}{a}\right)$;

m – индекс, принимающий числовые значения $m = 0, 1, 2, \dots$

Электромагнитное поле распространяющейся волны типа H_{mn} имеет компоненты:

$$\begin{aligned} \dot{H}_z &= H_0^{mn} J_m\left(\frac{\eta_{mn}r}{a}\right) \cos m\varphi \cdot e^{-j\beta_{mn}z}, \\ \dot{H}_r &= -jH_0^{mn} \frac{\beta_{mn}}{(\eta_{mn}/a)} J'_m\left(\frac{\eta_{mn}r}{a}\right) \cos m\varphi \cdot e^{-j\beta_{mn}z}, \\ \dot{H}_\varphi &= jH_0^{mn} \frac{\beta_{mn}}{(\eta_{mn}/a)^2} \frac{m}{r} J_m\left(\frac{\eta_{mn}r}{a}\right) \sin m\varphi \cdot e^{-j\beta_{mn}z}, \\ \dot{E}_r &= Z_H^{mn} \dot{H}_\varphi, \quad \dot{E}_\varphi = -Z_H^{mn} \dot{H}_r, \quad \dot{E}_z = 0, \end{aligned} \tag{2}$$

где $J_m\left(\frac{\eta_{mn}r}{a}\right)$ - функция Бесселя m -го порядка от аргумента $\left(\frac{\eta_{mn}r}{a}\right)$;

η_{mn} – n -й корень первой производной функция Бесселя m -го порядка ($n=1, 2, \dots$);

$J'_m\left(\frac{\eta_{mn}r}{a}\right)$ – первая производная функции Бесселя m -го порядка от аргумента

$\left(\frac{\eta_{mn}r}{a}\right)$.

В табл. 1 и 2 со справочными целями приведены значения некоторых корней функций Бесселя [7] и их первых производных.

Таблица 1 – Значения корней функций Бесселя $J_m(\xi_{mn})$

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
$m = 0$	2,405	5,520	8,654
$m = 1$	3,832	7,016	10,173
$m = 2$	5,136	8,417	11,620
$m = 3$	6,380	9,761	13,015

Таблица 2 – Значения корней первой производной функций Бесселя $J'_m(\eta_{mn})$

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
$m = 0$	3,832	7,016	10,174
$m = 1$	1,841	5,331	8,536
$m = 2$	3,054	6,705	9,965
$m = 3$	4,200	8,017	11,403

Индексы m и n означают: m означает число вариаций поля по угловой координате φ , а n – число вариаций поля по радиальной координате r . В частном случае $m=0$ амплитуды векторов электромагнитного поля не зависят от угловой координаты, структура поля обладает осевой симметрией: подобные типы волн называют симметричными.

Здесь и далее формулы из [9-11]. Критические длины волн типа H_{mn} находят по общей формуле $\lambda_{кр}^{mn} = \frac{2\pi}{k_{\perp}^{mn}}$ и они вычисляются

$$\lambda_{кр}^{mn} = 2\pi a / \eta_{mn} \quad (3)$$

Соответственно и для волн типа E_{mn}

$$\lambda_{кр}^{mn} = 2\pi a / \xi_{mn} \quad (4)$$

Волны H_{1n} и E_{0n} имеют равные критические длины волн и будут вырождены.

Конкретный тип волны в волноводе будет распространяться при условии:

$$\lambda_{кр}^{mn} > \lambda, \quad f_{кр}^{mn} < f,$$

где $\lambda_{кр}^{mn}$ – критическая длина волны данного типа колебания;

$$f_{кр}^{mn} = c / (\lambda_{кр}^{mn} \sqrt{\epsilon\mu}) \text{ – критическая частота.}$$

Соотношение между критическими длинами волн нескольких первых типов показано на рис. 2 [9-11].

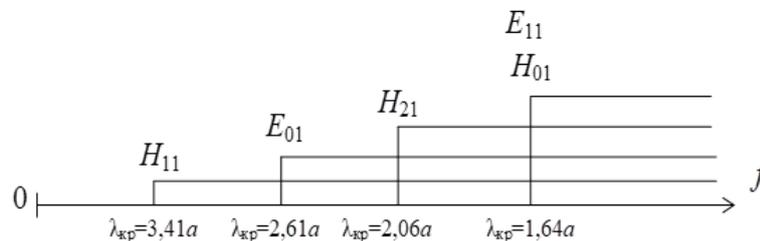


Рисунок 2 – Сравнительная диаграмма длин волн.

Сравнение Волн H_{11} , E_{01} и H_{01} в круглом волноводе.

В круглых волноводах чаще других используются волны типов H_{11} , E_{01} и H_{01} . Картина силовых линий вектора поля $E(a)$ и $H(b)$ основной волны показана на рис. 3 [9-11].

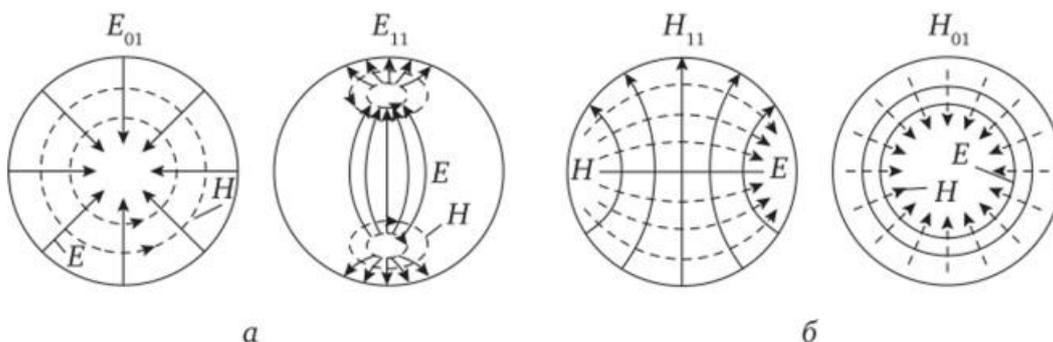


Рисунок 3 – Структура полей волн E_{11} и H_{11} , E_{01} и H_{01}

Волна H_{11} обладает наибольшей $\lambda_{кр}$ (рис. 3)

$$\lambda_{кр}^{H_{11}} = 3,413a \quad (5)$$

и является основной волной в круглом волноводе. Для обеспечения возможности ее распространения в одномодовом режиме должно выполняться условие

$$2,613a < \lambda < 3,413a \quad (6)$$

Волна H_{11} основного типа в круглом волноводе обладает существенным недостатком – неустойчивостью поляризации поля. В силу круговой симметрии контура стенок волновода в нем может распространяться волна H_{11} с любой ориентацией вектора E в поперечном сечении линии, что приводит к повороту структуры поля. Поляризационная неустойчивость – это следствие совершенной симметрии круглого волновода. Поскольку приемные устройства работают, как правило, на волну с определенной поляризацией, то поляризационная неустойчивость волны H_{11} препятствует использованию круглых волноводов с H_{11} в качестве линии передачи. Поляризационная неустойчивость снимается эллиптическим поперечным сечением, т.е. эллиптическим волноводом. Отметим тут же, что все симметричные волны поляризационно устойчивы.

Волна E_{01} – это следующая по $\lambda_{кр}$ волна. Волна типа E_{01} является наименьшей из симметричных волн и находит применение во вращающихся сочленениях. Критическая длина волны (рис. 3)

$$\lambda_{кр}^{E_{01}} = 2,613a \quad (7)$$

Для обеспечения возможности распространения волны типа E_{01} и исключения волн высших типов необходимо выполнить условие

$$2,057a < \lambda < 2,613a \quad (8)$$

где $2,057a$ – критическая длина волны ближайшего высшего типа H_{21} . При выполнении этого условия кроме волны E_{01} в волноводе может распространяться волна основного типа H_{11} . Волна типа E_{01} в силу круговой симметрии используется во вращательных сочленениях.

Определенные перспективы имеет передача электромагнитной энергии по круглому волноводу с помощью волны H_{01} . Это обусловлено тем, что с повышением частоты затухание волны этого типа уменьшается. Критическая длина волны (рис.3)

$$\lambda_{кр}^{H_{01}} = 1,641a \quad (9)$$

Волна типа H_{01} распространяется, если выполняется условие

$$1,223a < \lambda < 1,641a \quad (10)$$

При этом в волноводе могут распространяться и волны H_{11} , E_{01} , H_{21} . Таким образом, при использовании волны типа H_{01} необходимо принимать специальные меры к чистоте возбуждения волны H_{01} . Поле бегущей волны H_{01} определяется выражениями (2) при подстановке индексов волны $m=0$ и $n=1$.

Волна типа H_{01} имеет наименьшие потери, причем при повышении частоты затухание уменьшается. Это связано с тем, что поверхностный ток имеет только поперечные составляющие, так как возбуждается продольной составляющей вектора H_z , поэтому линии поверхностного тока имеют кольцевой характер. При повышении частоты продольная составляющая вектора уменьшается, т.е. волна приближается к типу ТЕМ, что приводит к уменьшению плотности поверхностного тока. При соотношении $a/\lambda > 3...4$ затухание этой волны намного меньше затухания волны типа H_{11} . При большом затухании решения уравнений максвелла не получаются столь простыми.

Круглые волноводы на волне типа H_{01} имеют затухание (1...2) дБ/км в коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Распространение волн других типов предотвращают, применяя дисковую или спиральную структуру антенны бегущей волны (АБВ). Подавляемые волны имеют продольную составляющую тока, поэтому приданной конструкции АБВ такая структура тока эффективно подавляется [13].

Для увеличения коэффициента перекрытия по частоте $K_f = \lambda_{max}/\lambda_{min}$ и с целью уменьшения продольных размеров антенны в работе видеоинспекции трубопроводов будем использовать двухзаходную спиральную плоскую антенну (рис. 4) [12], имеющую



Рисунок 4 – Спиральная антенна

(2.4GHZ-5.8GHZ 5W UWB Circular Polarization UWB Wideband Antenna Helical Circularly Antenna - купить по выгодной цене | AliExpress)

следующие параметры:

- 1) рабочая частота: 2,4 ГГц-5,8 ГГц;
- 2) мощность: 5 Вт;
- 3) усиление антенны: 3.5dBi;
- 4) направление излучения: осевая антенна;
- 5) режим поляризации: правильная круговая поляризация;
- 6) сопротивление антенны: 50 Ом;
- 7) обратные потери: <10 дБ
- 8) коэффициент стоячей волны: типичное значение 1,5
- 9) тип соединителя: SMA-розетка
- 10) размер антенны: 50*50*25 мм (без разъема)

Определение длин волн радиосигнала Wi-Fi – модуля в среде заполнения трубопроводов водоснабжения $\lambda_{\epsilon}^{2,4}$ и $\lambda_{\epsilon}^{5,8}$. Коэффициент затухания $\alpha_{\Sigma}^{2,4}$ и $\alpha_{\Sigma}^{5,8}$.

Робот видеоинспекции предназначен для работы в трубопроводах длительного срока эксплуатации. Перед его применением содержимое(вода) должно быть удалено, но в реальности до четверти диаметра в нижней части трубы заполнено иловыми отложениями. Поэтому при определении цифровых значений нашей направляющей системы мы это будем учитывать через параметры относительной диэлектрической проницаемости ϵ и удельной проводимости σ , приведенные в табл. 3 [14] для среды в виде влажной илистой почвы, сделав допущение, что труба полностью заполнена этим диэлектриком. Определим длину волны, распространяемую в данной среде по формуле:

$$\lambda_{д} = c / (f\sqrt{\epsilon}) \quad (11)$$

где c – скорость света в свободном пространстве 299792458 м/с; f – частота генерируемая Wi-Fi-модулем 2,4ГГц и 5,8ГГц; ε – относительная диэлектрическая проницаемость влажной почвы равная 30, тогда

$$\lambda_{д}^{2,4} = 0,0228 \text{ м} = 2,28 \text{ см}; \quad \lambda_{д}^{5,8} = 0,0094 \text{ м} = 0,94 \text{ см}$$

Условие распространения волн это когда $\lambda_{д} < \lambda_{кр}$. Для волны типа H_{01} критическая длина волны будет составлять $1,641a$ (9), где a – радиус волновода (рис. 1). Приравняв $\lambda_{д} = \lambda_{кр}$, можно определить минимальный диаметр труб распространения этой волны: $d=2a=2\cdot\lambda_{д}/1,641$. Для частоты 2,4ГГц - $d_{мин}= 27,8$ мм; для 5,8ГГц – $d_{мин}= 11,5$ мм.

Таблица 3 – Относительная диэлектрическая проницаемость ε и удельная проводимость σ некоторых природных сред

Природная среда	ε	$\sigma, \text{См/м}$
Морская вода	75	1÷6
Пресная вода	80	$(1\div3)10^{-2}$
Влажная почва	20÷30	$2\cdot10^{-2}\div3\cdot10^{-1}$
Сухая почва	3÷6	$10^{-5}\div2\cdot10^{-3}$
Мерзлая почва	3÷6	$10^{-3}\div10^{-2}$
Лед	4÷5	$10^{-2}\div10^{-1}$
Снег	1,2	10^{-6}
Лес	1,004	$10^{-6}\div10^{-5}$

Определим длину волны в волноводе для волны типа H_{01} двух частот Wi-Fi-модуля. Трубу выберем среднего диаметра для работа - Труба 245х9 ГОСТ 33228-2015, с внутренним диаметром 227мм. Т.е. радиус волновода $a = 11,35 \text{ см} = 0,1135 \text{ м}$.

$$\lambda_{г} = \frac{\lambda_{д}}{\sqrt{1 - \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \tag{12}$$

где $\lambda_{д}$ – длина волны в данной среде см. формулу (11); λ_0 – длина волны генератора в вакууме $\lambda_0=c/f$: $\lambda_0^{2,4} = 0,1249 \text{ м}$, $\lambda_0^{5,8} = 0,0517 \text{ м}$; $\varepsilon = 30$ - относительная диэлектрическая проницаемость по табл. 3; $\lambda_{кр} = 1,641\cdot a = 1,641\cdot 0,1135 = 0,1862 \text{ м}$ (9). Подставляя в (12), имеем

$$\lambda_{г}^{2,4} = 0,023 \text{ м} \qquad \lambda_{г}^{5,8} = 0,0095 \text{ м}$$

Затухание волн в волноводах зависит от потерь в металлических стенках и в среде, заполняющем волновод. Результирующий коэффициент ослабления волны в волноводе равен сумме коэффициентов ослабления, вызванных потерями в металлических стенках и диэлектрике:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{м} + \alpha_{д} \tag{13}$$

Коэффициент затухания, обусловленный потерями в металлических стенках круглого волновода для волны H_{01} , вычисляется следующим образом:

$$\alpha_{м} = \frac{2R_s}{Z_c \cdot a \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{г}}{2\lambda_{кр}}\right)^2}} \left(\frac{\lambda_{г}}{2\lambda_{кр}}\right)^2 \tag{14}$$

где $R_s = 1/\sigma \cdot \delta$ – поверхностное сопротивление стенок волновода, в Ом: $\sigma = 7,7 \cdot 10^7$ См/м – удельная проводимость Ст.08кп; $\delta = 30/\sqrt{j}$ – глубина проникновения ТВЧ в стенки волновода, в мм. Для частоты 2,4 ГГц $\delta^{2,4} = 2,014 \cdot 10^{-5}$ мм = $2,014 \cdot 10^{-7}$ м и для частоты 5,8 ГГц $\delta^{5,8} = 1,313 \cdot 10^{-5}$ мм = $1,313 \cdot 10^{-7}$ м. Отсюда $R_s^{2,4} = 0,065$ Ом, а $R_s^{5,8} = 0,099$ Ом;

$$Z_e = Z_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_{кр}}\right)^2} \quad \text{– характеристическое сопротивление волновода, в Ом:}$$

$Z_0 = 376,73$ Ом – характеристическое сопротивление плоской волны в свободном пространстве. Отсюда для частоты 2,4 ГГц $Z_e^{2,4} = 380$ Ом и для частоты 5,8 ГГц $Z_e^{5,8} = 377$ Ом.

Подставляя полученные значения в формулу (14) получим значения коэффициента затухания в стенках трубы для двух частот (чтобы получить погонное затухание в децибелах на метр, надо умножить результаты расчета на $20 \lg e = 8,69$):

$$\alpha_M^{2,4} = 1,168 \cdot 10^{-5} \text{ 1/м} = 1,012 \cdot 10^{-4} \text{ дБ/м}$$

$$\alpha_M^{5,8} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ дБ/м}$$

Для расчета коэффициента затухания α_D за счет потерь в диэлектрике воспользуемся формулой:

$$\alpha_D = \frac{\pi}{\lambda_r} \operatorname{tg} \delta \frac{Z_c}{Z_e}, \quad (15)$$

где δ – глубина проникновения радиоволн в различных земных средах в зависимости от частоты: для частот 2,4 ГГц, 5,8 ГГц и влажной почвы данные представлены на рис. 5 [15]: $\delta^{2,4} = 0,03$; $\delta^{5,8} = 0,01$; а $Z_c = 120\pi \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = 68,8$ Ом – характеристическое сопротивление среды заполняющей волновод (при $\mu=1$ и $\epsilon=30$ – для влажных почв).

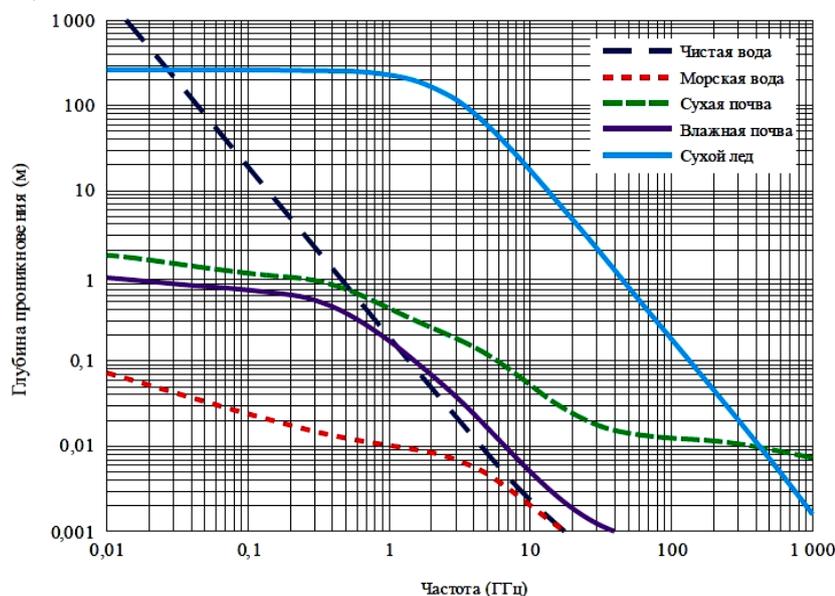


Рисунок 5 – Глубина проникновения δ радиоволн в различных земных средах

Подставляя численные значения в формулу (15), получим:

$$\alpha_{\Sigma}^{2,4} = 0,012777 \text{ 1/м} = 0,11 \text{ дБ/м}$$

$$\alpha_{\Sigma}^{5,8} = 0,01 \text{ 1/м} = 0,09 \text{ дБ/м}$$

Отсюда общий коэффициент затухания

$$\alpha_{\Sigma}^{2,4} = 0,1101 \text{ дБ/м} ; \alpha_{\Sigma}^{5,8} = 0,0995 \text{ дБ/м}$$

Вывод. Выбранная антенна бегущей волны удовлетворяет требованиям к роботу видеоспециалиста: расстояние прохождения участка внутри трубы до 100 м.

Список литературы

1. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ [Текст] / Лебедев И. В. – Том 1.
2. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. [Текст] / Сазонов Д. М.
3. Маттей Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи [Текст] / Д. Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс
4. Фельдштейн А. Л. Справочник по элементам волноводной техники [Текст] / Фельдштейн А. Л.
5. Ваганов Р. Б. Основы теории дифракции. [Текст] / Р.Б. Ваганов, Б.З. Кацеленбаум
6. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот [Текст] / Харвей А. Ф.
7. Янке Е. Справочник по специальным функциям [Текст] / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш
8. Донченко. А. В Гибридные типы волн в Н-волноводе с кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением [Текст] / А. В. Донченко, Г. Ф. Заргано, В. В. Земляков // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – № 2. – 2018. – С. 61-69.
9. Соловьянова И. П. Теория волновых процессов. Электромагнитные волны: учебное пособие [Текст] / И. П. Соловьянова, М. П. Наймушин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 132 с.
10. Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / Петров Б. М. – 2-е изд.
11. Пименов Ю. В. Техническая электродинамика. [Текст] / Ю. В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муровцов
12. Юрцев О. А. Антенны бегущей волны, антенные решетки, антенны коротких, средних и длинных волн [Текст] / Юрцев О. А. // Методическое пособие по курсу "Антенны и устройства СВЧ" для студентов специальности "Радиотехника" в 3-х частях. ч.3. – Минск: БГУИИР, 2001. – 69 с.
13. Барсуков С. Н. Электромагнитные волны в направляющих структурах: учебное пособие [Текст] / Барсуков С. Н. – Харьков: ХАИ, 2007. – 60 с.
14. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн [Текст] / Грудинская Г.П. – М.: Высшая школа, 1975.
15. Рекомендация МСЭ-R P.527-4 (06/2017). Электрические характеристики земной поверхности. Серия Р. Распространение радиоволн. [Текст].
16. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 2.4GHZ-5.8GHZ 5W UWB Circular Polarization UWB Wideband Antenna Helical Circularly Antenna - | AliExpress

References

1. Lebedev I. V. *Tekhnika i pribory SVCH* [Technique and microwave devices] Tom 1.
2. Sazonov D. M. *Antenny i ustroystva SVCH* [Antennas and microwave devices].
3. Matthey D. L. *Fil'try SVCH, soglasuyushchiye tsepi i tsepi svyazi* [Microwave filters, matching circuits and communication circuits] / D. L. Matthey, L. Yang, Ye.M.T. Dzhons
4. Fel'dshteyn A. L. *Spravochnik_po_elementam_volnovodnoy_tekhniki* [Reference_on_elements_of_waveguide technology].
5. Vaganov R. B. *Osnovy teorii difraktsii*. [Fundamentals of the theory of diffraction] / R.B. Vaganov, B.Z. Katselenbaum
6. Kharvey A. F. *Tekhnika svervysokikh chastot* [Technique of superhigh frequencies] / Kharvey A. F.
7. Yanke Ye. *Spravochnik_po_spetsial'nym funktsiyam* [Handbook of special functions] / Ye. Yanke, F. Emde, F. Lesh
8. Donchenko. A. V. *Gibridnyye tipy voln v N-volnovode s kusochno-sloistym dielektricheskim zapolneniyem* [Hybrid types of waves in an H-waveguide with piecewise-layered dielectric filling] / A. V. Donchenko, G. F. Zargano, V. V. Zemlyakov. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Izvestiya vuzov Rossii. Radioelectronics] № 2. 2018. S. 61-69.

9. Solov'yanova I. P. *Teoriya volnovykh protsessov. Elektromagnitnyye volny: uchebnoye posobiye* [Theory of wave processes. Electromagnetic waves: textbook] / I. P. Solov'yanova, M. P. Naymushin. Yekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2005. 132 s.
10. Petrov B. M. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* [Electrodynamics and propagation of radio waves] / Petrov B. M. 2-ye izd.
11. Pimenov YU. V. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics] / YU. V. Pimenov, V.I. Vol'man, A.D. Murovtsov
12. Yurtsev O. A. *Antenny begushchey volny, antennoye reshetki, anteny korotkikh, srednikh i dlin-nykh voln* [Traveling wave antennas, antenna arrays, antennas of short, medium and long waves]. *Metodicheskoye posobiye po kursu "Antenny i ustroystva SVCH" dlya studentov spetsial'nosti "Radiotekhnika" v 3-kh chastyakh. ch.3* [Methodological guide for the course "Antennas and microwave devices" for students of the specialty "Radio Engineering" in 3 parts. part 3] Minsk: BGUIR, 2001. 69 s.
13. Barsukov S. N. *Elektromagnitnyye volny v napravlyayushchikh strukturakh: uchebnoye posobiye* [Electromagnetic waves in guiding structures: textbook]. Khar'kov: KHAI, 2007. 60 s.
14. Grudinskaya G.P. *Rasprostraneniye radiovoln* [Propagation of radio waves]. M.: Vysshaya shkola, 1975.
15. *Rekomendatsiya MSE-R P.527-4 (06/2017) .Elektricheskiye kharakteristiki zemnoy poverkhnosti. Seriya R . Rasprostraneniye radiovoln.* [Recommendation ITU-R P.527-4 (06/2017) Electrical characteristics of the earth's surface. Series R. Propagation of radio waves].
16. 2.4GHZ-5.8GHZ 5W UWB Circular Polarization UWB Wideband Antenna Helical Circularly Antenna - | AliExpress

RESUME

O. A. Butov

Transmission of A Radio Signal Through Pipelines of Urban Water Supply networks

In this article, the parameters of radio signal attenuation in the pipelines of urban water supply networks are investigated.

When applying the above technique, the main wave of the radio signal in the pipeline was determined and the transmitting and receiving antenna of the traveling wave was selected, which is necessary for its transmission through this waveguide.

РЕЗЮМЕ

О.А. Бутов

Передача радиосигнала по трубопроводам городских сетей водоснабжения

В данной статье исследованы параметры затухания радиосигнала в трубопроводах городских сетей водоснабжения. При применении приведенной методики определены основная волна радиосигнала в трубопроводе и выбрана приемно-передающая антенна бегущей волны, необходимая для ее передачи по данному волноводу.

Статья поступила в редакцию