

УДК 621.396.949

Назаров А.М, Абдукадиров А.Х, Мадаминов Х.Х, Ликонцев А.Н.

## ОСЛАБЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ В КОРИДОРАХ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Основываясь на внешнем сходстве между прямоугольным волноводом и коридором здания на основе волноводной теории получены выражения для расчета ослабления электромагнитного поля в коридоре, необходимые для прогнозирования уровней поля мобильной связи и кибербезопасности внутри зданий.

**Ключевые слова:** Напряженность электромагнитного поля, аналог коридора в виде прямоугольного волновода, ослабление поля в коридоре

Постановление Президента от 18 апреля 2018 года № ПП-3673 «Об организационных мерах по ускоренной интеграции ведомственных информационных систем и реализации инновационных проектов» подтверждает важность и актуальность диссертационной работы поскольку в Узбекистане начинается опытная эксплуатация системы государственной мобильной связи, обеспечивающей мобильность и конфиденциальность. Естественно – важна информация о поглощении сигнала в стенах зданий.

Известно, что качество работы сотовой связи, беспроводного интернета и телевидения в первую очередь определяется уровнем сигнала в месте приема. Для его прогнозирования необходимо знание моделей или закономерностей распределения уровней поля. Особенно это важно для случая приема внутри помещений. Вопросы обеспечения кибербезопасности в зданиях также тесно связаны с ослаблением сигнала в стенах помещений.

Ранее в республиках Средней Азии практически отсутствовали публикации по особенностям распространения радиоволн внутри помещений, распределению уровней поля и моделям расчета уровней поля в помещениях коридор в здании имеет некоторое сходство с прямоугольным волноводом (рис.1), особенно если его стенки из проводящего или полупроводящего материала.

$$\left. \begin{aligned} E_x &= jZ_c k(n\pi/b) \cdot \cos(m\pi x/a) \cdot \sin(n\pi y/b) \cdot \exp(-\gamma_{mn}z), \\ E_y &= -jZ_c k\left(\frac{m\pi}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cdot \exp(-\gamma_{mn}z), \\ E_z &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

и для поперечных E-мод [1]:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= -\gamma_{mn}(m\pi/a) \cdot \cos(m\pi x/a) \cdot \sin(n\pi y/b) \cdot \exp(-\gamma_{mn}z), \\ E_y &= -\gamma_{mn}(n\pi/b) \cdot \sin(m\pi x/a) \cdot \cos(n\pi y/b) \cdot \exp(-\gamma_{mn}z), \\ E_z &= (\gamma_{mn} + k^2) \cdot \sin(m\pi x/a) \cdot \sin(n\pi y/b) \cdot \exp(-\gamma_{mn}z) \end{aligned} \right\} (2)$$

видно, что для компенсации составляющей  $E_x$  из системы уравнений (2) необходимо  $E_x$  из системы уравнений (1), уменьшить в  $Z_c k(n\pi/b)/(a/m\pi\gamma_{mn})$  раз. Тогда, при их сложении составляющая  $E_x$  исчезнет, а все остальные компоненты сохранятся. У такой волны электрическое поле лежит в плоскости  $yz$ , чем и обусловлено название продольной (LE) моды. Данные моды используются при рассмотрении широкого круга задач, для которых характерно сохранение поляризации, задаваемой падающей модой. В выражениях (1) и (2) использованы следующие обозначения:  $\gamma_{mn}$  - коэффициент распространения  $mn$ -моды,  $1/м$ ;  $E$  - вектор напряженности электрического поля В/м;  $Z_c$  и  $Z_0$  - соответственно характеристическое сопротивление среды и вакуума Ом;  $k$  - волновое число равное  $2\pi/\lambda$ ,  $1/м$ ;  $\lambda$  - длина волны, м;  $a$  - внутренний размер широкой стенки волновода, м;  $b$  - внутренний размер узкой стенки волновода, м;  $m, n$  - количество полуволн вдоль широкой и узкой стенок волновода.

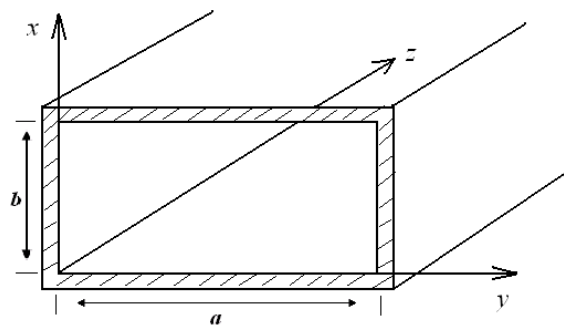


Рис.1. Представление коридора в виде отрезка прямоугольного волновода

Рассмотрим этот вопрос более подробно. При отсутствии потерь в волноводе продольные моды  $H$  и  $E$  с одинаковыми индексами являются вырожденными, т.е. имеют равные значения коэффициента распространения  $\gamma_{mn}$ . Поэтому суперпозиция этих мод позволяет получить более сложную моду, у которой отсутствует составляющая напряженности электрического поля  $E_x$ .

Сравнивая выражения для составляющей напряженности электрического поля  $E_x$  для поперечных  $H$ -мод в прямоугольном волноводе (рис.1) [1]:

Аналогично можно обратить в нуль любую другую из поперечных компонент векторов напряженности электрического  $E$  и магнитного полей  $H$ . Однако случай, когда  $E_x = 0$ , представляет интерес, поскольку встречается наиболее часто. Поскольку, основная мода и первые моды высших порядков в прямоугольном волноводе являются  $H$ -волнами, то ограничимся рассмотрением составляющих  $H$ -волн.

Основной волне соответствует сочетание индексов  $m = 1$  и  $n = 0$ . Именно такая волна может нормально распространяться в прямоугольном волноводе при наличии потерь в его стенках.

Рассмотрим случай прямоугольного волновода с неидеально проводящими стенками. При высокой проводимости  $\sigma$  металла стенок в структуре поля появляются лишь небольшие возмущения по сравнению со случаем, когда потери отсутствуют. Поэтому полученные выражения можно использовать для нахождения поправки к  $\gamma_{mn}$  на частотах, достаточно

далеких от критической. Такая методика основана на следующих соображениях. Так как на границе раздела двух сред тангенциальная составляющая магнитного поля  $H_t$  непрерывна, в металле появляется соответствующее магнитное поле. Комплексная диэлектрическая проницаемость металла стенки определяется, в основном,  $\sigma$  и достаточно велика.

В соответствии с законами преломления направление распространения волны в металле почти перпендикулярно граничной поверхности и фактически не зависит от угла, под которым волна падает из волновода. Следовательно, составляющая поля  $H_t$  вызывает появление перпендикулярной ей составляющей электрического поля  $E_z$  описываемой выражением

$$E_z = Z_c \cdot H_t. \quad (3)$$

Здесь  $Z_c = (\mu/\varepsilon)^{1/2} = Z_0 \cdot Z_{пов}$ , где  $Z_{пов}$  - нормированное поверхностное сопротивление, равное

$$Z_{пов} = (\mu_r/\varepsilon_r)^{1/2} \approx (\mu_r/(-j60\lambda_0\sigma))^{1/2}, \quad (4)$$

где  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме.

Если  $n$  - направление нормали к поверхности металла, то изменение  $E_z$  и  $H_t$  в этом направлении описывается множителем

$$\exp(-jkn) \approx \exp(-j\mu_r 60\lambda_0\sigma)^{1/2}.$$

Так как плотность тока равна  $J = \sigma E_z$ , потери мощности на единицу площади поверхности стенки составляют  $P_L = \int_0^\infty |J|^2 \sigma^{-1} dS \approx |\zeta H_t|^2 (\mu_r/60\lambda_0) \cdot$

$$\cdot \int_0^\infty \exp[-2k_0 n (\mu_r 30\lambda_0\sigma)^{1/2} dS] = Z_0 |H_t|^2 R_{пов}, \quad (5)$$

где  $R_{пов} = Re(Z_{пов})$  - активная часть нормированного поверхностного сопротивления. Интегрирование этого выражения по контуру поперечного сечения волновода позволяет при малой вдоль оси  $z$  длине линии определить полную мощность потерь

$$P_L = z Z_0 \cdot R_{пов} \int |H_t|^2 dl, \quad (6)$$

где  $l$  - орт, касательный к контуру поперечного сечения волновода.

где  $\Lambda$  - длина волны в волноводе, м.

Если принять магнитную проницаемость действительной, то согласно (4)

$$R_{пов} = Re(Z_{пов}) = \sqrt{\mu_r/120\lambda_0 \cdot \sigma}. \quad (11)$$

Выражение для коэффициента ослабления волн типа  $H_{10}$  в прямоугольном полом металлическом волноводе через поверхностное сопротивление  $R_{пов}$  имеет вид [1]

$$\alpha_{H10} = \frac{R_{пов}}{b \cdot Z_c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \cdot \left[ 1 + 2 \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right], \quad (12)$$

где  $\sigma$  - удельная проводимость стенок волновода, См/м;

$Z_c$  - волновое сопротивление среды, Ом;

$R_{пов}$  - поверхностное сопротивление, равное  $\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_a/\sigma}$ , Ом;

$\mu_a$  - абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Для унификации расчетов в коридорах можно ввести понятие «эффективной удельной проводимости»  $\sigma_{эф}$  стенок коридора, которая учитывает, как проводящие свойства стенок коридора, их неровности, так и людей, некоторый набор стандартной мебели, которая обычно находится в коридоре (вешалки для одежды и т.д.).

Ниже, в таблицах 1 и 2, приведены значения

Если коэффициент ослабления вдоль оси  $z$  равен  $\alpha$ , то мощность потерь в небольшом отрезке линии длиной  $z$  равна

$$P_0 \cdot [1 - \exp(-2\alpha z)] \approx P_0 \cdot 2\alpha z,$$

где  $P_0$  - мощность, поступающая в сечение  $z = 0$ . Приравняв эту величину к выражению (6), получаем

$$\alpha = (Z_0 \cdot R_{пов}/2P_0) \int |H_t|^2 dl. \quad (7)$$

Данное выражение применимо при анализе волноводов любого типа, если поверхностное сопротивление изотропно и длина волны не слишком близка к критической. Последнее условие обусловлено тем, что мощность  $P_0$  обращается в нуль при конечном значении  $H_t$ , т.е. ослабление становится бесконечно большим. К  $H$ - и  $E$ -модам прямоугольного волновода можно применить уравнение (10). Отметим, что поскольку составляющая  $H_t$  в волноводе без потерь равна плотности тока на поверхности стенок, влияние стенок согласно (5) эквивалентно введению активного сопротивления  $Z_0 R_{пов}$  на каждую единицу поверхности.

Для  $H$ -моды, распространяющейся в волноводе, заполненном средой без потерь, используя (3.1) и (3.6), получаем

$$P_0 = \int_0^a \int_0^b (E_x H_y^* - E_y H_x^*) dx dy = (2/\varepsilon_n) \cdot (n^2 \pi^2/b^2 + m^2 \pi^2/a^2) \cdot Z_B k (-j\gamma_{mn}) ab/4, \quad (8)$$

где принято, что  $\gamma_{mn}$  - мнимая величина. Здесь

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_n = 1, \quad n = 0; \\ \varepsilon_n = 2, \quad n \geq 1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

После ряда преобразований получаем, в частности, для основной моды ( $m=1, n=0$ )

$$\alpha = \sqrt{\varepsilon_r/\mu_r} \cdot R_{пов} \cdot (\Lambda/\lambda) \cdot (1/b + \lambda^2/2a^3), \quad (10)$$

удельной электрической проводимости  $\sigma$  и относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  биологических тканей и жидкостей организма человека при 37°C.

Таблица 1

Биосубстрат человека	$\sigma_{чел}$ , См/м
Цельная кровь	0,54
Плазма крови	1,47-1,60
Желудочный сок	1,00-1,25
Спинномозговая жидкость	1,80
Мышечная ткань	0,66
Нервная ткань	0,04
Жировая ткань	0,02
Сухая кожа	$3 \cdot 10^{-4}$
Костная ткань	$5 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2

Биосубстрат	$\varepsilon_{чел}$
Вода	81
Кровь	85
Белок	72
Крахмал	12
Белое вещество мозга	90
Серое вещество мозга	85
Вещество здорового нерва	89

Человеческое тело является полупроводящим. В нем много жидких субстанций, что приводит к ослаблению радиоволн.

Величину поглощения в людях, находящихся в коридоре, можно определить при помощи дополнительного множителя  $F_{\text{чел}}$

$$F_{\text{чел}} = \exp[-(2\pi/\lambda) \cdot p \cdot l], \quad (13)$$

где вспомогательный параметр

$$p = \sqrt{\frac{-\epsilon_{\text{чел}} + \sqrt{\epsilon_{\text{чел}}^2 + (60\lambda\sigma_{\text{чел}})}}{2}}; \quad (14)$$

$\epsilon_{\text{чел}}$  - относительная диэлектрическая проницаемость тел людей;

$\sigma_{\text{чел}}$  - удельная проводимость тел людей, См/м.

Так, зная поперечные геометрические размеры коридора, а также величину погонного ослабления полученную на основании экспериментального исследования из формулы (12) получаем выражение для «эффективной удельной проводимости»

$$\sigma_{\text{эф}} = \frac{2,512}{\lambda \cdot \alpha_{\text{эксп}}^2 \cdot b^2 \cdot [1 - (\lambda/2a)^2]} \cdot \left[ 1 + 2 \frac{b}{a} \cdot \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^2, \text{ См/м}, \quad (15)$$

где  $\alpha_{\text{эксп}}$  - значение погонного ослабления в дБ/м, полученное экспериментально;

$a$  - ширина коридора, м;

$b$  - высота коридора, м.

В свою очередь, зная значение «эффективной удельной проводимости», можно рассчитать величину погонного ослабления в коридоре из выражения

$$\alpha_{\text{эксп}} = \left\{ 2,512 \cdot \left[ 1 + 2 \frac{b}{a} \cdot \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^2 : \left\{ \sigma_{\text{эф}} \cdot \lambda \cdot b^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \right\}^{1/2}, \text{ дБ/м}. \quad (16)$$

Умножив величину  $\alpha_{\text{эксп}}$  на значение длины коридора, можно найти величину ослабления радиоволны.

Таким образом, представленный материал может быть полезен специалистам занимающимся вопросами планирования мобильной связи и кибербезопасности.

### Литература

[1] Pimenov YU.V., Volman V.I., Muravsov A.D. *Texnicheskaya elektrodinamika. Uchebnoe posobie dlya vuzov.* - M.: Radio i svyaz. 2000.

[2] Wolfle G. and Landstorfer F. M. *Dominant Paths*

УДК: 621.396.67.01

А. Хотамов

## ОБЪЕКТ КООРДИНАТАЛАРИНИ АНИҚЛОВЧИ РАДИОМОНИТОРИНГ ТИЗИМИНИНГ АЛГОРИТМИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ

Ушбу мақола радиомониторинг жараёнидаги қабул килувчи антенна қурилмалари мавжуд тизимларда назорат вақтини қисқартириш мақсадида “П6-23А ва LPA 2-01M” антенналарнинг гибрид комбинацияланган тизими ишлаб чиқишга бағишланган. Бунинг натижасида 80 МГц дан 12,0 ГГц гача бўлган частоталар диапазонини бир вақтнинг ўзида, вертикал ва горизонтал қублаишда, ҳамда 360 даража кенгликда ўлчаш имкониятини берадиган қурилма яратилган.

**Калит сўзлар:** радиомониторинг, индустриал радиохалақит, радиоэлектрон воситалар, юқори частотали қурилмалар, радионурланиш манбаи.

### Қириш

Кейинги йилларда радио-сигналлар маълумотлар оқимини мавжуд йўналтирилган симсиз алоқа воситаларига мослаштиришга имкон яратувчи радиосигналларни мониторинглаш усуллари ишлаб чиқиш, радиоалоқа, локация, телебошқарув, навигация, телеметрия, симсиз алоқа технологиялар, рақамли

for the Field Strength Prediction. // International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PHMRC), Sept., 1994.- PP. 486-490.

### Сведения об авторах:

#### Назаров Абдулазиз Муминович

д.т.н., Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Кафедра «Радиотехнический устройства и систем», профессор  
 телефон: +998 90 999 20 29

e-mail: [Nazarov57@mail.ru](mailto:Nazarov57@mail.ru)

#### Абдукадыров Алишер Хабибуллаевич

к.т.н., Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Кафедра «Технологии мобильной связи», Доцент.

телефон: +998 90 998 38 40

e-mail: [alimot@mail.ru](mailto:alimot@mail.ru)

#### Ликонцев Алексей Николаевич

к.т.н., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций. Кафедра радиосистем и обработки сигналов. Доцент.

телефон: +79119218191.

e-mail: [Likontsev-rts@mail.ru](mailto:Likontsev-rts@mail.ru)

#### Мадаминов Хайдар Худаярович

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Кафедра «Технологии мобильной связи», старший преподаватель.

Сотовый телефон: +998 94 6855151

e-mail: [h.madaminov1978@gmail.com](mailto:h.madaminov1978@gmail.com)

A.M. Nazarov, A.Kh. Abdukadirov, Kh.H.

Madaminov, A.N. Likontsev

### The weakening of the field in the corridors of the building using a model of a rectangular waveguide

Based on the external similarity between a rectangular waveguide and a building corridor, based on the waveguide theory, expressions are obtained for calculating the attenuation of the electromagnetic field in the corridor, necessary for predicting the levels of the mobile communication field and cybersecurity inside buildings.

**Keywords:** electromagnetic field strength, analog of a corridor in the form of a rectangular waveguide, field weakening in a corridor