

Распространение электромагнитных волн вдоль плоской и криволинейной границ раздела двух сред

Обсуждаются условия распространения электромагнитных волн вдоль плоской и криволинейной границ раздела двух сред. Рассматриваются свойства вытекающих, поверхностных и ползущих волн.

Ключевые слова: электромагнитные волны, плоская граница, криволинейная граница, вытекающие волны, поверхностные волны, ползущие волны

Введение

Поверхностные электромагнитные (ЭМ) волны представляют собой направленное электромагнитное излучение, локализованное вблизи поверхности раздела двух сред и распространяющееся вдоль этой поверхности. Его интенсивность быстро падает в направлении, перпендикулярном поверхности раздела. При определенных условиях вблизи поверхности в некотором направлении возникает излучение электромагнитных волн. Интерес к распространению волн вблизи поверхности возникает в связи с использованием электромагнитных волн для передачи информации в беспроводной системе, расположенной на теле человека (англ. Wireless Body Area Network, WBAN).

Принято определять следующие виды электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границы раздела двух сред: поверхностные волны, вытекающие волны и ползущие.

1) Поверхностные волны (ПВ) (англ. Surface waves, SW) распространяются вдоль поверхности раздела двух сред и быстро затухают при удалении от поверхности раздела;

2) Вытекающие волны (ВВ) (англ. Leaky waves, LW) излучаются под углом к поверхности раздела двух сред. Условие излучения ВВ определяется соотношением диэлектрических проницаемостей диэлектрического материала по обе стороны границы;

3) Ползущие волны (ПЗВ) (англ. Creeping waves, CW) распространяются по касательной к криволинейной поверхности и способны огибать поверхность, попадая в область тени.

Плоская поверхность поддерживает вытекающие волны и поверхностные волны. Криволинейная поверхность поддерживает ползущие волны, и, кроме того, цилиндрические вытекающие волны и цилиндрические поверхностные волны, которые по своим свойствам близки к ВВ и ПВ на плоской поверхности.

Распространение ЭМ волны над плоской границей раздела двух сред. На рис.1 показана схема достаточно тонкого по сравнению с длиной волны диэлектрического слоя ($h \ll \lambda_g$) над поверхностью металла. Примем, что волна распространяется вдоль оси z , а размер диэлектрической пластины достаточно велик вдоль оси x , причем распределение полей не зависит от координаты x , то есть $\partial/\partial x = 0$. Представим магнитную компоненту ЭМ волны в виде:

$$\vec{H}(y, z) = \vec{e}_x H_0 f(y) \exp(-ik_z z), \quad (1)$$

где вид функции $f(y)$ зависит от граничных условий в структуре. Электрическая компонента описывается теми же функциями от координат y и z , что и магнитная в(1). Граничное условие для электрической компоненты на поверхности металла ($y = 0$) имеет вид $E_z(y, z)_{y=0} = 0$ и соответственно функция $f(y)$ определяется выражением:

$$f(y) = \cos k_y y \quad (2)$$

В соответствии с (1) и (2) компоненты поля в диэлектрическом слое толщиной h и в воздухе ($y \geq h$) имеют вид:

$$\begin{aligned} H_x^{(1)}(y, z) &= H_0^{(1)} \cos(k_y^{(1)} y) \cdot \exp(-ik_z z) \\ E_z^{(1)}(y, z) &= -i \frac{k_y^{(1)}}{\omega \epsilon_0 \epsilon_d} H_0^{(1)} \sin(k_y^{(1)} y) \cdot \exp(-ik_z z) \end{aligned} \quad 0 \leq y \leq h, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_x^{(2)}(y, z) &= H_0^{(2)} \exp(-k_y^{(2)} y) \cdot \exp(-ik_z z) \\ E_z^{(2)}(y, z) &= -i \frac{k_y^{(1)}}{\omega \epsilon_0} H_0^{(2)} \exp(-k_y^{(2)} y) \cdot \exp(-ik_z z) \end{aligned} \quad y \geq h, \quad (4)$$

где $k_y^{(1)}$ и $k_y^{(2)}$ - поперечные волновые числа в диэлектрике и в воздухе соответственно. При вещественном $k_y^{(2)}$ все компоненты поля обращаются в нуль при $y \rightarrow \infty$.

При $y = h$ выполняется непрерывность касательных составляющих поля. Используя уравнения (3) и (4), получим:

$$\begin{aligned} H_0^{(1)} \cos(k_y^{(1)} h) &= H_0^{(2)} \exp(-k_y^{(2)} h) \\ H_0^{(1)} \frac{k_y^{(1)}}{\epsilon_d} \sin(k_y^{(1)} h) &= H_0^{(2)} \cdot k_y^{(2)} \exp(-k_y^{(2)} h) \end{aligned} \quad (5)$$

Определитель полученной системы уравнений равняется нулю:

$$\cos(k_y^{(1)} h) \cdot k_y^{(2)} - \frac{k_y^{(1)}}{\epsilon_d} \sin(k_y^{(1)} h) = 0. \quad (6)$$

Из волнового уравнения получаем связь между волновыми числами:

$$k_y^{(2)} = \sqrt{k_z^2 - k^2} \quad \text{и} \quad k_y^{(1)} = \sqrt{\epsilon_d k^2 - k_z^2}, \quad k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), получаем дисперсионное уравнение относительно k_z :

$$\epsilon_d \cdot \sqrt{k_z^2 - k^2} - \sqrt{\epsilon_d k^2 - k_z^2} \cdot \operatorname{tg} \left(\sqrt{\epsilon_d k^2 - k_z^2} \cdot h \right) = 0. \quad (8)$$

Введем обозначения $\xi = \frac{k_z}{k}$ и $\theta = kh$ и подставим в (8). В результате получаем

дисперсионное уравнение в виде:

$$\epsilon_d \cdot \sqrt{\xi^2 - 1} - \sqrt{\epsilon_d - \xi^2} \cdot \operatorname{tg} \left(\theta \cdot \sqrt{\epsilon_d - \xi^2} \right) = 0. \quad (9)$$

Из (9) определяется продольное волновое число k_z , из (7) находятся поперечные волновые числа. Распределение поля вдоль структуры описывается уравнениями (3) и (4). На рис. 1 представлено распределение амплитуды магнитного поля на частоте 4 ГГц в структуре металл-диэлектрик-воздух с диэлектрическим слоем толщиной 7,5 мм, расположенным на

идеальном металле, для двух значений диэлектрической проницаемости: $\epsilon_d = 5$ (синяя линия) и $\epsilon_d = 10$ (красная линия). Интенсивность поверхностной волны убывает по мере удаления от поверхности.

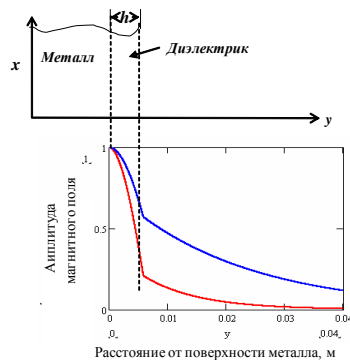


Рисунок 1

Распространяющиеся поверхностные волны и вытекающие волны. Рассмотрим распространение ЭМ волн в диэлектрической пластине с учетом полного внутреннего отражения. В этом случае энергия электромагнитной волны ограничивается областью диэлектрического волновода. Полное внутреннее отражение возникает, если угол преломления луча ψ , выходящего через границу раздела, превышает 90° . При меньших углах преломления полное внутреннее отражение отсутствует, и возникает режим вытекающей волны: энергия электромагнитной волны по мере распространения просачивается в окружающее пространство [1, 2].

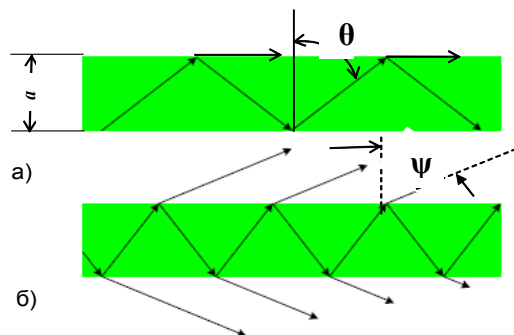


Рисунок 2

На рис.2 (а) показан случай полного внутреннего отражения и соответственно распространения ЭМ волны внутри диэлектрического слоя. Вдоль поверхности существует распространяющаяся поверхностная волна, затухающая по экспоненте по мере удаления от поверхности. Рис.2 (б) отвечает условиям возникновения вытекающих волн. Угол падения θ и угол преломления ψ связаны следующими соотношениями:

$$\cos(\psi) = \sqrt{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot [\sin(\theta)]^2}, \quad \cos(\theta) = \frac{\lambda_1}{2a} \quad (10)$$

Здесь λ_1 - длина волны в диэлектрике, ϵ_1 - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ϵ_2 - диэлектрическая проницаемость окружающей среды. Толщина диэлектрической пластины a . Режим вытекающих волн используется для разработки антенн, направление излучения которых определяется (контролируется) соотношением диэлектрических проницаемостей диэлектрической пластины и окружающего пространства, а также частотой ЭМ волны.

Электромагнитные волны над криволинейной поверхностью. На рис. 3,а показано формирование волны в диэлектрическом слое толщиной a , нанесенном на цилиндрическую поверхность радиуса R . Отражение от криволинейной поверхности приводит к тому, что волна, попадая на границу между диэлектрическими слоями, не испытывает полного внутреннего отражения, так как поверхность, вдоль которой должна распространяться волна, наклонена на угол $\Delta\psi$ по отношению к касательной. Предположим, что угол наклона поверхности слоя, в котором распространяется волна, равен углу отклонения волны при отражении внутри волноведущего слоя: $\Delta\psi = \theta$. Тогда угол преломления определяется выражением [2], модифицированным для рассматриваемого случая ($\alpha \neq 0$):

$$\psi(\theta) = \arccos \left\{ \sqrt{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} [\sin(\theta)]^2 \cdot (1 - \alpha)} \right\}, \quad \alpha = a/R. \quad (11)$$

На рис. 3,б показана зависимость угла преломления от угла падения волны при разной толщине диэлектрического слоя с проницаемостью $\epsilon_r = 50$ на проводящей цилиндрической поверхности. Условие полного внутреннего отражения от диэлектрического слоя на цилиндрической поверхности возникает при большем угле падения, чем в случае отражения от плоского диэлектрического слоя.

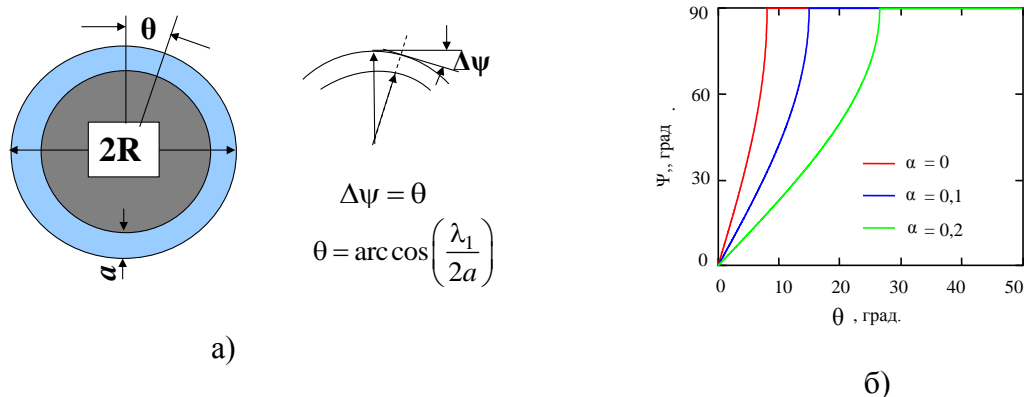


Рисунок 3

Распространение ЭМ волн вдоль криволинейной поверхности сопровождается явлением дифракции [3]. Типы волн, распространяющиеся вдоль границы между слоями с различными свойствами, определяются степенью кривизны поверхности и толщиной диэлектрического слоя, нормированного к длине волны. На рис.4 показана схема растекания волн над плоской поверхностью, переходящей в цилиндрическую [4]. Возникновение ползущих волн связано с дифракцией электромагнитного излучения над криволинейной поверхностью.

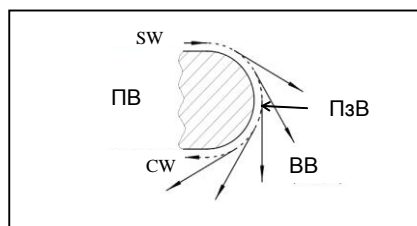


Рисунок 4

Анализ показывает, что в низкочастотном пределе распространяются вытекающие волны, которые излучаются в пространство; на более высоких частотах возникают поверхностные или ползущие волны [4]. При этом поверхностные волны распространяются вдоль плоской границы раздела, а ползущие волны - вдоль криволинейной поверхности. Диаграмма распространяющихся волн для среды «воздух-диэлектрический слой» на поверхности проводящего цилиндра приведена для различных комбинаций условий на рис. 5.

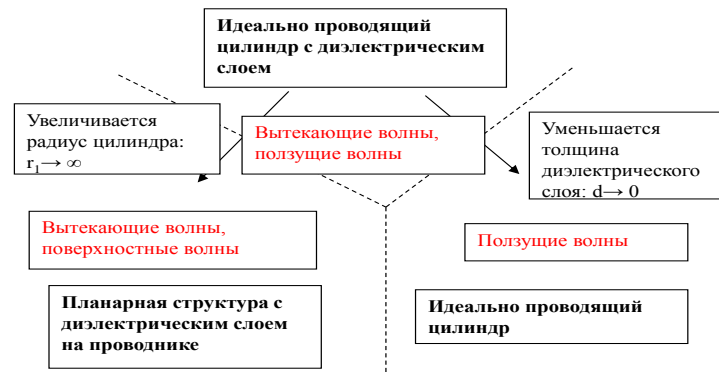


Рисунок 5

Результаты исследования распространения волн по поверхности человеческого тела на частоте 2,45 ГГц представлены в [5]. Моделирование выполнялось для фантома (мужского) с параметрами, соответствующими биологической ткани ($\epsilon_r = 53$, $\sigma = 1,8 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$), измерения выполнялись на реальном объекте. Поверхностные волны распространяются вдоль плоской поверхности тела (вдоль груди и живота), вокруг тела распространяются ползущие волны, которые регистрируются на обратной стороне тела (на спине). Затухание ползущей волны при распространении вокруг торса 40-45 дБ, что позволяет уверенно регистрировать приемником на спине сигнал, распространяющийся от антенны, расположенной в области груди. Поверхностная волна испытывает меньшее затухание. Оба типа волн используются при создании системы WBAN с использованием большого числа датчиков, расположенных на поверхности человеческого тела.

Аналогичные исследования проведены по исследованию распространения ползущих волн по поверхности диэлектрического цилиндра с потерями на частоте 60 ГГц [6]. Здесь в качестве материала диэлектрика использовался аналог кожи человека с параметрами $\epsilon_r = 7,795$, $\sigma = 36,4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$

Библиографический список

1. Collin R. E. Field Theory of Guided Waves // - New York: McGraw-Hil - 1960.
2. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов // - Москва: Сов. Радио. – 1971. – С. 664.
3. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн, // - Москва: Сов. Радио. – 1970. – С. 520.
4. Paknys R. The Relation Between Creeping Waves, Leaky Waves, and Surface Waves / R. Paknys, D. R. Jackson // - IEEE Trans. on Antennas and Propag. - 2005. - Vol. 53. - № 3, pp. 898 – 907.
5. Conway G.A. An Analytical path-Loss Model for On-Body Radio Propagation / G.A. Conway, W.G. Scanlon, S.L. Cotton, M.J. Bantum // - 2010 URSI Intern. Symp. on Electromagnetic Theory, 2010 IEEE. - Pp.332-33.
6. Mavridis T. Creeping Wave Model of Diffraction of an Obliquely Incident Plane Wave by a Circular Cylinder at 60 GHz / T. Mavridis, L. Petrillo, J. Sarrazin, D. Lautru, A. Benlarbi-Delai, et al. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. - 2014. - Vol. 62. - № 3, pp. 1372 – 1377.