

## ВЗАИМОВЛИЯНИЕ УГОЛКОВЫХ ВИБРАТОРОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

### Введение

В современных радиотехнических комплексах в качестве излучающих систем часто используются вибраторные антенны, плечи которых расходятся из точки питания под углом (т.н. V-образные, или уголковые вибраторы). Они применяются в длинноволновой радиоастрономии [1], в подповерхностной радиолокации [2], в качестве элементов антенных решеток систем РЛС дальнего обнаружения [3], в качестве антенн для приема-передачи СШП сигналов [4] и ряде других областей. Широкому использованию V-образных вибраторных излучателей способствует их малая стоимость и относительная простота конструкции. В работе [1] показано, что такие излучатели имеют более широкую полосу частот, чем прямой вибратор, и обеспечивают лучшее согласование с питающей линией.

Исследования уголковых вибраторов ведутся достаточно давно. Одной из первых работ, в которых были рассмотрены свойства одиночного симметричного уголкового вибратора, размещенного в свободном пространстве, является работа [5]. В работе [6] теоретические зависимости для такого вибратора, полученные методом моментов, сравнивались с экспериментальными результатами. Система из двух излучателей в свободном пространстве рассмотрена в работе [7]. В ней представлены зависимости взаимных проводимостей между половинными уголковыми вибраторами от расстояния между ними. При этом параметром выступает угол между плечами. Соотношения для расчета собственных и взаимных сопротивлений V-образных вибраторов приведены в работе [8]. Определению взаимных сопротивлений вибраторных антенн в составе решетки над идеально проводящим экраном посвящена работа [9]. Наряду с этим, такие излучатели часто располагаются в непосредственной близости от поверхности земли. Однако вопрос о том, как влияет наличие реальной земли на взаимосвязь уголковых излучателей, остается открытым.

В работе сделана попытка восполнить этот пробел, для чего использовалась методика учета влияния границы раздела двух сред на параметры линейных антенн, описанная в [10, 11].

### Постановка задачи

Рассмотрим излучающую систему из двух горизонтальных V-образных вибраторов, расположенную вблизи границы раздела двух сред (рис. 1). Верхняя среда, в которой располагаются излучатели, представляет собой идеальный диэлектрик с параметрами вакуума а нижняя среда – диэлектрик с произвольными параметрами  $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ .

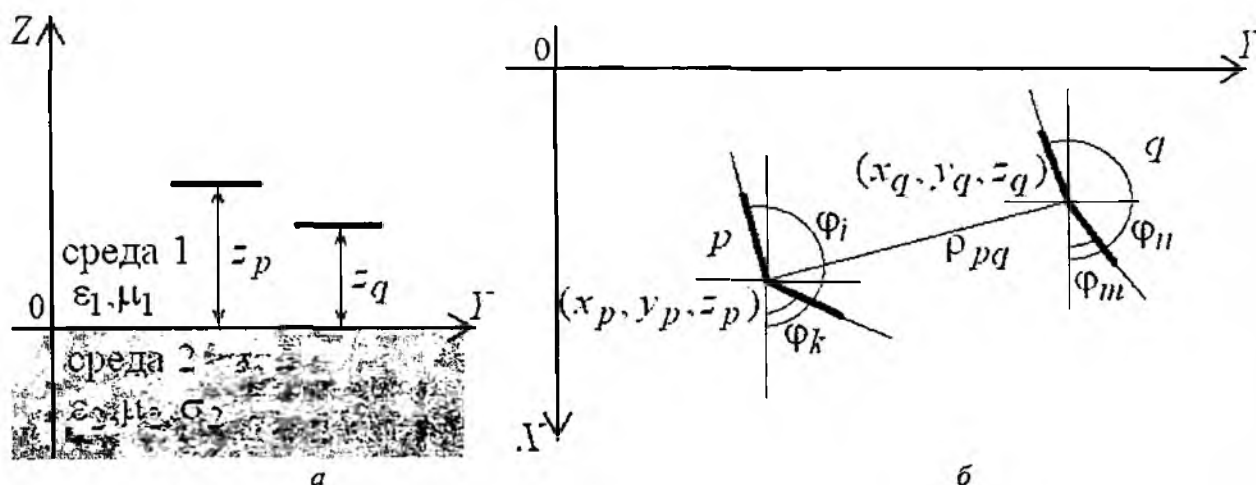


Рис. 1

Входы  $p$ -го и  $q$ -го вибраторов находятся в точках с координатами  $(x_p, y_p, z_p)$  и  $(x_q, y_q, z_q)$ , соответственно. Расстояние между ними –  $\rho_{pq}$ . Углы  $\varphi_1, \varphi_k, \varphi_m, \varphi_n$  – произвольные. Определим взаимные сопротивления между этими вибраторами.

### Основные соотношения

Для определения взаимного сопротивления между уголковыми вибраторами представим их в виде излучающей системы, в которой плечи вибраторов считаются самостоятельными излучателями. Распределение тока на  $n$ -м плече представим кусочно-синусоидальной функцией [12]:

$$g_n(\ell) = \begin{cases} \frac{\sin k_1(l_n - \ell)}{\sin k_1 l_n}, & 0 \leq \ell \leq l_n; \\ 0, & \ell > l_n \end{cases} \quad (1)$$

где  $l_n$  – длина излучателя;  $\ell$  – координата, проходящая вдоль его оси;  $k_{1,2} = \omega \sqrt{\tilde{\epsilon}_{1,2} \mu_{1,2}}$  и  $\tilde{\epsilon}_{1,2} = \epsilon_{1,2}(1 - j\sigma_{1,2}/\omega\epsilon_{1,2})$  – волновое число и комплексная диэлектрическая проницаемость среды (первой и второй, соответственно).

Расчет взаимных сопротивлений между плечами вибраторов выполним по методике, изложенной в работах [10, 11], суть которой заключается в том, что при определении взаимных сопротивлений методом наведенных ЭДС [13], используется разложение полей в спектр плоских волн [14], где спектральная функция связана с распределением тока на излучателе соотношением

$$s_n(\kappa, \alpha) = \frac{1}{l_{\text{эф}} l_n} \int_0^{l_n} g_n(\ell) e^{j\kappa \cos(\alpha - \varphi_n) \ell} d\ell, \quad (2)$$

где  $l_{\text{эф}} = \frac{1 - \cos k_1 l_n}{k_1 \sin k_1 l_n}$  – действующая длина  $n$ -го излучателя;  $\kappa_x = \kappa \cos \alpha$ ,  $\kappa_y = \kappa \sin \alpha$ , и

$\gamma_{1,2} = \sqrt{\kappa^2 - k_{1,2}^2}$  – поперечные и продольные волновые числа (среда 1 и 2, соответственно);  $\varphi_n$  – угол поворота оси излучателя относительно оси  $X$ . В случае, когда распределение тока удовлетворяет выражению (1), спектральная функция будет иметь вид

$$s_n(\kappa) = \frac{\exp\left[jk_1 l_n \left(\frac{\kappa}{k_1} \cos(\alpha - \varphi_n)\right)\right] - \cos k_1 l_n - j \left(\frac{\kappa}{k_1} \cos(\alpha - \varphi_n)\right) \sin k_1 l_n}{(1 - \cos k_1 l_n) \left[1 - \left(\frac{\kappa}{k_1} \cos(\alpha - \varphi_n)\right)^2\right]} \quad (3)$$

Для удобства определения взаимного сопротивления между плечами вибраторов представим его в виде двух слагаемых, первое из которых соответствует случаю идеально проводящего экрана, а второе – учитывает свойства реальной земли [10]:

$$Z_{mn} = Z_{mn}^{\infty} + \Delta Z_{mn}. \quad (4)$$

Взаимное сопротивление для вибраторов над экраном можно вычислить по известным формулам (приведенным, например, в [9]), а для определения добавки, воспользуемся результатами, полученными в работе [11]:

$$\Delta Z_{mn} = -j \frac{Z_{01} l_{cm} l_{cn}}{4\pi} \int_0^{\infty} \left( \gamma_1 T_c \cdot I_c(\kappa) - \frac{1}{\gamma_1} \tilde{T}_u \cdot I_u(\kappa) \right) e^{-\gamma_1(z_n + z_m)} \kappa d\kappa, \quad (5)$$

где

$$\left. \begin{aligned} I_c(\kappa) \\ I_u(\kappa) \end{aligned} \right\} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} s_m^*(\kappa, \alpha) s_n(\kappa, \alpha) \begin{cases} \cos(\alpha - \varphi_m) \cos(\alpha - \varphi_n) \\ \sin(\alpha - \varphi_m) \sin(\alpha - \varphi_n) \end{cases} e^{j\kappa \rho_{mn} \cos(\alpha - \varphi_{mn})} d\alpha;$$

$$T_\epsilon = \frac{2\gamma_2 \bar{\epsilon}_1}{\gamma_1 \bar{\epsilon}_2 + \gamma_2 \bar{\epsilon}_1}; \quad \bar{T}_\mu = \frac{2\gamma_1 \mu_2}{\gamma_1 \mu_2 + \gamma_2 \mu_1}; \quad Z_{01} = \sqrt{\mu_1 / \epsilon_1}.$$

Использование метода наведенных ЭДС позволит представить напряжение на входах плеч с помощью уравнений Кирхгофа:

$$\begin{aligned} U_k &= Z_{kk} I_k + Z_{ki} I_i + Z_{km} I_m + Z_{kn} I_n \\ U_i &= Z_{ik} I_k + Z_{ii} I_i + Z_{im} I_m + Z_{in} I_n \\ U_m &= Z_{mk} I_k + Z_{mi} I_i + Z_{mm} I_m + Z_{mn} I_n \\ U_n &= Z_{nk} I_k + Z_{ni} I_i + Z_{nm} I_m + Z_{nn} I_n \end{aligned} \quad (6)$$

После подстановки в уравнения (6) соотношений  $U_k + U_i = U_p$ ,  $U_m + U_n = U_q$ ,  $I_k = I_i = I_p$ ,  $I_m = I_n = I_q$ , взаимные сопротивления между уголковыми вибраторами (рис. 1, б) можно представить в виде

$$Z_{pq} = Z_{ni} + Z_{mi} + Z_{mk} + Z_{lk}. \quad (7)$$

Соотношение (7) позволяет определить взаимное влияние уголкового вибратора, расположенных вблизи границы раздела двух сред.

### Численные результаты

Приведем примеры расчета взаимных сопротивлений, между двумя идентичными уголковыми вибраторами с различной ориентацией на плоскости, в зависимости от расстояния между их центрами (рис. 2). Взаимные сопротивления нормированы к действительной части собственного сопротивления уголкового вибратора в свободном пространстве. Расчеты проводились на частоте  $f = 6$  МГц. Параметры земли принимались равными  $\epsilon_r = 10$ ,  $\mu_r = 1$ ,  $\sigma = 0,01$  [1/Ом·м]. Вибраторы располагались в одной плоскости на высоте  $0,25 \lambda$ .

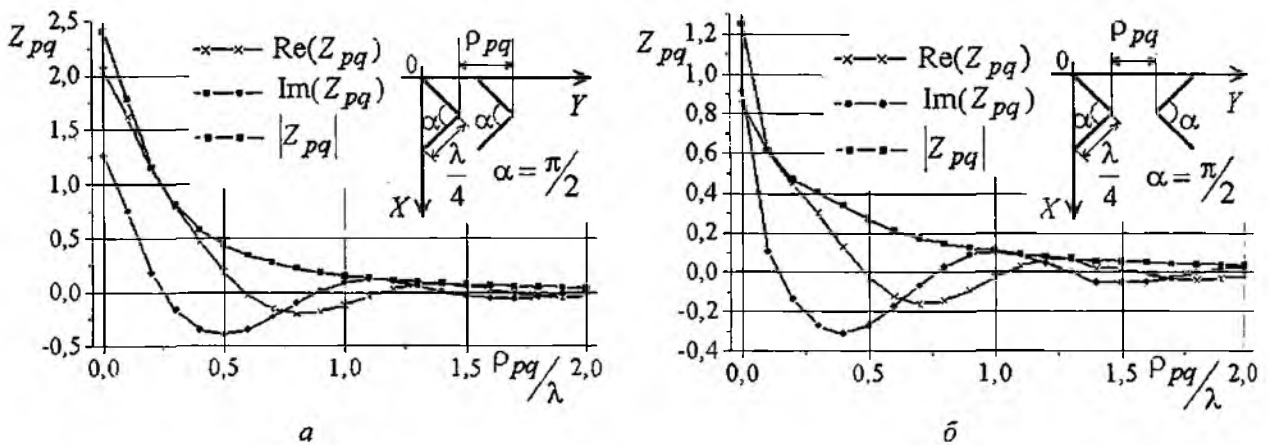


Рис. 2

Из графиков, приведенных на рис. 2, видно, что взаимное сопротивление между уголковыми вибраторами быстро убывает, и составляет по модулю примерно 2-3% от собственно сопротивления уже на расстоянии  $2\lambda$ . Сравнение полученных зависимостей с взаимными сопротивлениями между прямыми ( $\alpha = 180^\circ$ ) параллельными полуволновыми вибраторами [15] показывает, что в случае уголкового вибратора взаимное влияние меньше.

Это объясняется тем, что взаимное сопротивление между вибраторами, согласно (6) является суммой взаимных сопротивлений между отдельными плечами. Величина наведенной ЭДС, а следовательно, и взаимное влияние между проволочными излучателями максимально только в том случае, когда эти излучатели размещены параллельно друг другу. Взаимосвязь между ортогональными излучателями будет минимальной. Таким образом, видим, что взаимные сопротивления между уголковыми излучателями всегда будут меньше, чем между прямыми параллельными вибраторами.

## Заклучение

Представленная методика расчета взаимного сопротивления позволяет корректно учитывать влияние границы раздела двух сред на взаимные сопротивления между горизонтальными уголковыми вибраторами. Показано, что величина взаимного сопротивления между уголковыми излучателями будет меньше, чем между прямыми параллельными вибраторами. Полученные результаты могут быть использованы при разработке излучающих систем, состоящих из уголковых вибраторов, расположенных в непосредственной близости от плоской границы раздела двух сред.

**Список литературы:** 1. *Ellingson S. W.* Antennas for the Next Generation of Low-Frequency Radio Telescopes // *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on.* 2005. V. 53, I. 8, P. 1. P.2480 – 2489. 2. *Montoya T.P., Smith G.S.* Resistively-loaded Vee antennas for short-pulse ground penetrating radar // 1996 IEEE AP-S Intern. Symp. Dig. 1996. V. 3. P. 2068 – 2071. 3. *Брукнер Э.* Радиолокационные станции с фазированными антенными решетками // *В мире науки.* 1985. Вып. 4. С. 54-65. 4. *Mohamed A., Shafai L.* Investigation on Vee Dipole Antennas for Ultra Wideband Applications // ANTEM/URSI 2009. 13th International Symposium. 2009. P. 1-4. 5. *Щелкунов С., Фриис Г.* Антенны. Теория и практика. М.: Сов. радио. 1955. 604 с. 6. *Jones J.* A parametric study of the center-fed vee dipole antenna // *Antennas and Propagation Society International Symposium.* 1972. V. 10. P. 69-72. 7. *Richmond J. H.* Admittance matrix of coupled V-antennas // *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on.* 1970. V. 18, I. 6. P. 820 – 821. 8. *Лавров Г.А.* Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. М: Связь, 1975. 128 с. 9. *Кудин В.П.* Двухканальная ФАР из турникетных вибраторов V типа // *Антенны.* 2006. Вып. 11 (114). С. 56-62. 10. *Токарский П.Л., Панченко Ю.А.* КПД решеток магнитных излучателей, расположенных над границей раздела двух сред // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* 2006. Вып. 146. С. 83-88. 11. *Токарский П.Л.* Энергетические характеристики решеток горизонтальных вибраторов над границей раздела двух сред // *Электромагнитные волны и электронные системы (Москва).* 2004. Т.9. №3-4. С.59-65. 12. *Вычислительные методы в электродинамике* / Под ред. Р. Митры; Пер. с англ.; Под ред. Э.Л. Бурштейна. М.: Мир, 1977. 485 с. 13. *Коротковолновые антенны* / Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко и др.; Под ред. Г.З. Айзенберга. М.: Радио и связь, 1985. 536с. 14. *Марков Г.Т., Чаплин А.Ф.* Возбуждение электромагнитных волн. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1983. 296 с. 15. *Tokarsky P.L.* Mutual resistances between horizontal wire antennas near an interface // *International Conference on Antenna Theory and Techniques, 9-12 September, 2003, Sevastopol, Ukraine* pp.161-164.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редакцию 08.05.2009