

Выводы

При реализации предлагаемого метода, основанного на применении адаптивных устройств, использующих пространственные и поляризационные различия между сигналом и помехами, оказывается возможным проведение исследований метеорного радиоканала полуактивной локации даже при наличии местных помех.

Научная новизна данного исследования состоит в том, что предложено применение метода разнесенного адаптивного приема для метеорной радиосвязи и метеорного исследования.

Практическая значимость предлагаемого решения состоит в том, что значительно расширяется область применения метода полуактивной локации при метеорных исследованиях, и тот объем научной информации, который может быть получен на его основе, также значительно увеличивается.

Литература: 1. Антипов И. Е., Бавыкина В. В., Коваль Ю. А., Шкарлет А. И. Оценка возможности приема ТВ сигналов через метеорные следы и её экспериментальное подтверждение. 1996. 196 с. 2. Антипов И. Е., Коваль Ю. А., Нестеренко Г. В. О возможности пассивной радиолокации метеорных следов // Радиотехника. 2004. Вып. 136. С. 91 - 94. 3. Антипов И.Е., Бавыкина В.В., Коваль Ю.А., Нестеренко Г.В., Троцин О. Л. Прием телевизионных

сигналов времени и частоты по метеорному радиоканалу // Радиотехника: 2001. Вып. 117. С. 42-45. 4. Грудинская Г. П. Распространение радиоволн. М.: Высш. школа, 1967. 244 с. 5. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с. 6. Лосев Ю. И. ред Адаптивная компенсация помех в каналах связи. М., 1988. 208 с. 7. Седов С.А. Индивидуальные видеосредства. Киев: Наук. думка. 1990. 750 с. 8. Антипов И.Е. Оптимизация ориентации диаграмм направленности антенн метеорных радиотехнических систем с целью повышения их пропускной способности в условиях коротких трасс. Дисс... канд. техн. наук. Харьков, 1996. 144 с.

Поступила в редколлегию 30.03.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Титаренко Л. А.

Антипов Иван Евгеньевич, канд. техн. наук, докторант каф. ОРТ ХНУРЭ. Научные интересы: метеорная радиосвязь, метеорное распространение радиоволн. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 8-057-700-22-84.

Коваль Юрий Александрович, д-р техн. наук, проф. каф. ОРТ ХНУРЭ. Научные интересы: метеорная радиосвязь, синхронизация шкал времени. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 8-057-700-22-84.

Сапрыкин Анатолий Викторович, соискатель ХНУРЭ, проходчик, АП шахта им. А.Ф. Засядько. Научные интересы: радиоэлектроника. Адрес: Украина, 83119, Донецк, ул. Щетинина, 16, кв. 2, тел. 8-097-9327450.

УДК 621.372.8

ЗАПРЕДЕЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

СЛИПЧЕНКО Н.И.

Приводится аналитический расчет запределного резонатора сложной структуры с диэлектрическими неоднородностями цилиндрической формы. Получена система уравнений в общем виде, которая позволяет определить коэффициенты отражения и передачи рассматриваемой структуры.

Введение

Использование диэлектрических неоднородностей при расчете запределных резонаторов сложной структуры объясняется следующими полезными для практики обстоятельствами:

— электродинамические характеристики исследуемых резонаторов можно изменять, варьируя диаметры диэлектрических цилиндров и изменяя диэлектрические проницаемости материалов, из которых они изготовлены. В пределе при достаточно малых размерах цилиндров и больших значениях проницаемостей ма-

териалов можно перейти в каждой составной части запределного резонатора просто к диэлектрическому резонатору. При этом приближенно можно полагать, что стенки волновода оказывают небольшое возмущение на электромагнитные поля диэлектрического резонатора. Анализ для таких случаев приведен в [1-3];

— если уменьшать поперечные размеры волновода, то на частотах, ниже критических, существуют участки с нераспространяющимися волнами (запределные режимы), при этом в областях диэлектрических неоднородностей сохраняются распространяющиеся волны.

В результате использования волноводно-диэлектрических структур с запределными связями появляется возможность создавать резонансные элементы с достаточно большой нагруженной добротностью. В связи с этим создание и описание математических моделей подобных структур остается востребованным с точки зрения последующего анализа протекающих в них процессов.

Постановка цели и задач исследования

Рассмотрим волноводно-диэлектрический резонатор сложной структуры с одной диэлектрической неоднородностью цилиндрической формы, а второй — плоской формы, который возбуждается прямоуголь-

ным волноводом с распространяющейся волной H_{10} (см. рис. 1 из [4], но начало координат переносится в точку $z = l_1$). При анализе такого волновода используются те же предположения, что и при анализе сложного диэлектрического резонатора с плоскими диэлектрическими слоями [4]. Главное отличие от [4] состоит в том, что распределение полей в продольном направлении в областях диэлектрических цилиндров описывается с помощью специально введенных функций.

Цель данного исследования – построить математическую модель волноводно-диэлектрического резонатора сложной структуры с одной диэлектрической неоднородностью цилиндрической формы и одним диэлектрическим элементом плоской формы для изучения его свойств и последующего проектирования.

Для достижения поставленной цели следует решить такие задачи:

- 1) описать граничные условия на основе геометрии структуры и постановки задачи;
- 2) сформулировать общий вид искомых электромагнитных полей в терминах функций распределения волн;
- 3) выписать систему функциональных уравнений;
- 4) получить систему линейных алгебраических уравнений относительно амплитудных коэффициентов падающих и отраженных волн в каждой частичной области резонатора, решая которые можно вычислить амплитудно-частотные характеристики рассматриваемой структуры.

Решение задачи

Учитывая сказанное выше, результирующее электрическое поле E_y представим в следующем виде:

$$E_y^A = \Phi_1^A \exp[-i\beta_1^A(z + l_1)] + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^- \Phi_m^A \exp[i\beta_m^A(z + l_1)], \quad z < -l_1; \quad (1)$$

$$E_y^I = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n^I [B_n^+ \exp(-\beta_n^I z) + B_n^- \exp(\beta_n^I z)], \quad (2)$$

$$-l_1 < z < 0,$$

$$E_y^{II} = \sum_{k=1}^{\infty} [C_k^+ \Phi_k^{II+}(x, z) + C_k^- \Phi_k^{II-}(x, z)], \quad (3)$$

$$0 < z < l_2,$$

$$E_y^{III} = \sum_{p=1}^{\infty} \Phi_p^{III} [D_p^+ \exp(-\beta_p^{III}(z - l_2)) +$$

$$+ D_p^- \exp(\beta_p^{III}(z - l_2))], \quad l_2 < z < l_2 + l_3, \quad (4)$$

$$E_y^B = \sum_{q=1}^{\infty} \Phi_q^B E_q^+ \exp[-i\beta_q^B(z - l_2 - l_3)], \quad (5)$$

$$l_2 + l_3 < z,$$

$$E_y^{IV} = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n^{IV}(x) [\tilde{B}_n^+ \exp(-\beta_n^{IV}(z - L_2)) + \tilde{B}_n^- \exp(\beta_n^{IV}(z - L_2))], \quad (6)$$

$$E_y^V = \sum_{s=1}^{\infty} \Phi_s^V(x) [\tilde{C}_s^+ \exp(-i\beta_s^V(z - L_2 - l_4)) + \tilde{C}_s^- \exp(i\beta_s^V(z - L_2 - l_4))], \quad (7)$$

$$E_y^{VI} = \sum_{p=1}^{\infty} \Phi_p^{VI}(x) [\tilde{D}_p^+ \exp(-\beta_p^{VI}(z - L_2 - l_4 - l_5)) + \tilde{D}_p^- \exp(\beta_p^{VI}(z - L_2 - l_4 - l_5))], \quad (8)$$

$$E_y^C = \sum_{q=1}^{\infty} \Phi_q^C(x) \exp(-i\beta_q^C(z - L_3)) \tilde{E}_q^+, \quad (9)$$

где $\Phi_k^{II+}(x, z)$, $\Phi_k^{II-}(x, z)$ – функции распределения волн квази- H_{0k} на участке волновода с диэлектрическим цилиндром; $l_2 = D$ – диаметр цилиндра.

Подводящий волновод запитан основной волной прямоугольного волновода H_{10} единичной амплитуды. Геометрические размеры и проницаемости слоев выбираются так, чтобы в каждом звене возникали участки с нераспространяющимися волнами (запредельные) [5, 6]. При таких условиях амплитуды волн с большими номерами довольно быстро затухают по мере их удаления от сечений, в которых они возбуждаются. На электрическое поле E_y на границах областей, прилегающих к различным волноводам, налагается условие непрерывности. Такое же условие должно выполняться и в отношении поперечного магнитного поля H_x .

В сечениях $z = -l_1$, $z = 0$, $z = D$, $z = D + l_3$ должны выполняться условия непрерывности для E_y и dE_y/dz . В результате выполнения указанных выше условий получаем следующую систему функцио-

нальных уравнений относительно искомых амплитудных коэффициентов электромагнитных полей в каждой частичной области:

$$\begin{aligned} \Phi_1^A + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^- \Phi_m^A = \\ = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n^I [B_n^+ \exp(\beta_n^I l_1) + B_n^- \exp(-\beta_n^I l_1)], \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -i\beta_1^A \Phi_1^A + i \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m^A A_m^- \Phi_m^A = \\ = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n^I \Phi_n^I [-B_n^+ \exp(\beta_n^I l_1) + B_n^- \exp(-\beta_n^I l_1)], \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n^I (B_n^+ + B_n^-) = \\ = \sum_{k=1}^{\infty} [C_k^+ \Phi_k^{\Pi+}(x, 0) + C_k^- \Phi_k^{\Pi-}(x, 0)], \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n^I \Phi_n^I (-B_n^+ + B_n^-) = \\ = \sum_{k=1}^{\infty} [C_k^+ (\Phi_k^{\Pi+}(x, 0))' + C_k^- (\Phi_k^{\Pi-}(x, 0))'], \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} [C_k^+ \Phi_k^{\Pi+}(x, D) + C_k^- \Phi_k^{\Pi-}(x, D)] = \\ = \sum_{p=1}^{\infty} \Phi_p^{\text{III}} (D_p^+ + D_p^-), \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} [C_k^+ (\Phi_k^{\Pi+}(x, D))' + C_k^- (\Phi_k^{\Pi-}(x, D))'] = \\ = \sum_{p=1}^{\infty} \beta_p^{\text{III}} \Phi_p^{\text{III}} (-D_p^+ + D_p^-), \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{\infty} \Phi_p^{\text{III}} [D_p^+ \exp(-\beta_p^{\text{III}} l_3) + D_p^- \exp(\beta_p^{\text{III}} l_3)] = \\ = \sum_{q=1}^{\infty} \Phi_q^{\text{B}} (E_q^+ + E_q^-), \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{\infty} \beta_p^{\text{III}} \Phi_p^{\text{III}} [-D_p^+ \exp(-\beta_p^{\text{III}} l_3) + D_p^- \exp(\beta_p^{\text{III}} l_3)] = \\ = -i \sum_{q=1}^{\infty} \beta_q^{\text{B}} \Phi_q^{\text{B}} (E_q^+ + E_q^-), \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{q=1}^{\infty} \Phi_q^{\text{B}}(x) [E_q^+ \exp(-i\beta_q^{\text{B}} (L_2 - L_1)) + \\ + E_q^- \exp(i\beta_q^{\text{B}} (L_2 - L_1))] = \\ = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n^{\text{IV}}(x) (\tilde{B}_n^+ + \tilde{B}_n^-), \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{q=1}^{\infty} i\beta_q^{\text{B}} \Phi_q^{\text{B}}(x) [-E_q^+ \exp(-i\beta_q^{\text{B}} (L_2 - L_1)) + \\ + E_q^- \exp(i\beta_q^{\text{B}} (L_2 - L_1))] = \\ = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n^{\text{IV}} \Phi_n^{\text{IV}}(x) (-\tilde{B}_n^+ + \tilde{B}_n^-), \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n^{\text{IV}}(x) [\tilde{B}_n^+ \exp(-\beta_n^{\text{IV}} l_4) + \tilde{B}_n^- \exp(\beta_n^{\text{IV}} l_4)] = \\ = \sum_{s=1}^{\infty} \Phi_s^{\text{V}}(x) (\tilde{C}_s^+ + \tilde{C}_s^-), \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n^{\text{IV}} \Phi_n^{\text{IV}}(x) [-\tilde{B}_n^+ \exp(-\beta_n^{\text{IV}} l_4) + \tilde{B}_n^- \exp(\beta_n^{\text{IV}} l_4)] = \\ = \sum_{s=1}^{\infty} i\beta_s^{\text{V}} \Phi_s^{\text{V}}(x) (-\tilde{C}_s^+ + \tilde{C}_s^-), \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^{\infty} \Phi_s^{\text{V}}(x) [\tilde{C}_s^+ \exp(-i\beta_s^{\text{V}} l_5) + \tilde{C}_s^- \exp(i\beta_s^{\text{V}} l_5)] = \\ = \sum_{p=1}^{\infty} \Phi_p^{\text{VI}}(x) (\tilde{D}_p^+ + \tilde{D}_p^-), \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^{\infty} i\beta_s^{\text{V}} \Phi_s^{\text{V}}(x) [-\tilde{C}_s^+ \exp(-i\beta_s^{\text{V}} l_5) + \tilde{C}_s^- \exp(i\beta_s^{\text{V}} l_5)] = \\ = \sum_{p=1}^{\infty} \beta_p^{\text{VI}} \Phi_p^{\text{VI}}(x) (-\tilde{D}_p^+ + \tilde{D}_p^-), \quad (23) \end{aligned}$$

$$\sum_{p=1}^{\infty} \Phi_p^{VI}(x) [\tilde{D}_p^+ \exp(-\beta_p^{VI} l_6) + \tilde{D}_p^- \exp(\beta_p^{VI} l_6)] = \beta_m^{III} (-D_m^+ + D_m^-), \quad (31)$$

$$= \sum_{q=1}^{\infty} \Phi_q^C(x) \tilde{E}_q^+, \quad (24)$$

$$\sum_{p=1}^{\infty} \xi_{mp} [D_p^+ \exp(-\beta_p^{III} l_3) + D_p^- \exp(\beta_p^{III} l_3)] = E_m^+ + E_m^-, \quad (32)$$

$$\sum_{p=1}^{\infty} i\beta_p^{VI} \Phi_p^{VI}(x) [-\tilde{D}_p^+ \exp(-\beta_p^{VI} l_6) + \tilde{D}_p^- \exp(\beta_p^{VI} l_6)] = \sum_{p=1}^{\infty} \beta_p^{III} \xi_{mp} [-D_p^+ \exp(-\beta_p^{III} l_3) + D_p^- \exp(\beta_p^{III} l_3)] =$$

$$= \sum_{q=1}^{\infty} \Phi_q^C(x) \beta_q^C \tilde{E}_q^+. \quad (25)$$

$$= i\beta_m^B (-E_m^+ + E_m^-), \quad (33)$$

Как указано в [5, с. 44], для определения функций $\Phi_k^{II+}(x, z)$, $\Phi_k^{II-}(x, z)$ участок волновода с диэлектрическим цилиндром следует заменить волноводом такого же сечения, заполненным эквивалентной продольно-неоднородной средой. Тогда поперечное электрическое поле в нем будет описываться функцией $\Phi_k(x)$, причем

$$\Phi_k^{II+}(x, z) = \Phi_k(x) F_1^{(k)}(z),$$

$$\Phi_k^{II-}(x, z) = \Phi_k(x) F_2^{(k)}(z),$$

где $F_1^{(k)}(z)$, $F_2^{(k)}(z)$ – функции распределения поперечного электрического поля в продольном направлении для прямой и обратной волн с номером k .

С учетом сказанного из уравнений (10)-(25) следует такая система относительно неизвестных коэффициентов:

$$\delta_{1m} + A_m^- = \sum_{n=1}^{\infty} v_{nm} (B_n^+ \exp(\beta_n^I l_1) + B_n^- \exp(-\beta_n^I l_1)), \quad (26)$$

$$-i\beta_1^A \delta_{1m} + i\beta_m^A A_m^- = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n^I v_{nm} (-B_n^+ \exp(\beta_n^I l_1) + B_n^- \exp(-\beta_n^I l_1)), \quad (27)$$

$$B_m^+ + B_m^- = C_m^+ F_1^{(m)}(0) + C_m^- F_2^{(m)}(0), \quad (28)$$

$$\beta_m^I [-B_m^+ + B_m^-] = C_m^+ (F_1^{(m)}(0))' + C_m^- (F_2^{(m)}(0))', \quad (29)$$

$$C_m^+ F_1^{(m)}(D) + C_m^- F_2^{(m)}(D) = D_m^+ + D_m^-, \quad (30)$$

$$C_m^+ (F_1^{(m)}(D))' + C_m^- (F_2^{(m)}(D))' =$$

$$E_m^+ \exp(-i\beta_m^B (L_2 - L_1)) + E_m^- \exp(i\beta_m^B (L_2 - L_1)) =$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_{mn} (\tilde{B}_n^+ + \tilde{B}_n^-), \quad (34)$$

$$i\beta_m^B [-E_m^+ \exp(-i\beta_m^B (L_2 - L_1)) +$$

$$+ E_m^- \exp(i\beta_m^B (L_2 - L_1))] =$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n^{IV} \zeta_{mn} (-\tilde{B}_n^+ + \tilde{B}_n^-), \quad (35)$$

$$\tilde{B}_m^+ \exp(-\beta_m^{IV} l_4) + \tilde{B}_m^- \exp(\beta_m^{IV} l_4) = \tilde{C}_m^+ + \tilde{C}_m^-, \quad (36)$$

$$\beta_m^{IV} [-\tilde{B}_m^+ \exp(-\beta_m^{IV} l_4) + \tilde{B}_m^- \exp(\beta_m^{IV} l_4)] =$$

$$= i\beta_m^V (-\tilde{C}_m^+ + \tilde{C}_m^-), \quad (37)$$

$$\tilde{C}_m^+ \exp(-i\beta_m^V l_5) + \tilde{C}_m^- \exp(i\beta_m^V l_5) = \tilde{D}_m^+ + \tilde{D}_m^-, \quad (38)$$

$$i\beta_m^V [-\tilde{C}_m^+ \exp(-i\beta_m^V l_5) + \tilde{C}_m^- \exp(i\beta_m^V l_5)] =$$

$$= \beta_m^{VI} (-\tilde{D}_m^+ + \tilde{D}_m^-), \quad (39)$$

$$\sum_{p=1}^{\infty} \vartheta_{mp} [\tilde{D}_p^+ \exp(-\beta_p^{VI} l_6) + \tilde{D}_p^- \exp(\beta_p^{VI} l_6)] = \tilde{E}_m, \quad (40)$$

$$i \sum_{p=1}^{\infty} \beta_p^{VI} \vartheta_{mp} [-\tilde{D}_p^+ \exp(-\beta_p^{VI} l_6) + \tilde{D}_p^- \exp(\beta_p^{VI} l_6)] = \beta_m^C \tilde{E}_m. \quad (41)$$

Выводы

1. В результате решения поставленной граничной электродинамической задачи получена в общем виде без наложения каких-либо ограничений на геометрические размеры структуры система линейных алгебраических уравнений, из которой могут быть найдены амплитудно-частотные характеристики исследуемого объекта.

2. Для случая одноволнового приближения, когда в соответствующих рядах удерживается только первое слагаемое, бесконечные системы становятся конечными, что позволяет получить выражения для коэффициентов отражения и передачи рассматриваемого резонатора.

Литература: 1. Шеламов Г.Н. Диэлектрические и ферритовые резонаторы в СВЧ устройствах // Радиотехника.

1973. Т. 28, № 12. С. 22-27. 2. *Bladel V.-J.* Dielectric resonator in waveguide above cut-off // АЕБ. 1978. 32, N 12. P. 465-472. 3. *Ильченко М.Е., Мирских Г.А.* Расчет волноводных фильтров с диэлектрическими СВЧ резонаторами // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1973. Т. XXI, № 8. С. 90-93. 4. *Слипченко Н.И.* Волноводно-диэлектрические резонаторы сложной структуры. Аналитический расчет // Радиоэлектроника и информатика. 2004. №3. С. 9-13. 5. *Каплевич Ю.Б.* Волноводные диэлектрические фильтры. М.: Связь, 1980. 136с. 6. *Кириллов Л.Г., Двоскина Ю.Н.* СВЧ устройства на запредельных волноводах (обзор) // Зарубежная радиоэлектроника, 1974. №3. С.93-120.

Поступила в редколлегию 12.04.2006

Рецензент: д-р физ.-мат наук, проф. Чурюмов Г.И.

Слипченко Николай Иванович, канд. техн. наук, профессор, проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: радиофизика и электроника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 702-10-20.