

Коэффициенты отражения неоднородной анизотропной импедансной плоскости, переотражающей несколько падающих волн в двух заданных направлениях

Ю.В.Юханов, Т.Ю Привалова.

Южный Федеральный университет, 125009, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, e-mail: yu_yukhanov@mail.ru, tatyana.privalova@gmail.com

В работе впервые получены коэффициенты отражения для неоднородной анизотропной импедансной плоскости, отражающей несколько одновременно падающих с различных направлений однородных плоских волн в двух заданных направлениях на согласованной и крессовой поляризациях. Получены выражения для диаграмм рассеяния.

In this paper the reflection coefficients for an inhomogeneous anisotropic impedance plane, reflecting several homogeneous plane waves simultaneously falling from different directions in two given directions on co- and cross-polarizations, were obtained in the first time. Expressions for scattering diagrams were obtained.

Введение

В системах связи, в радиолокационных станциях, линиях спутниковой связи и для решения научных задач, таких как радиоастрономия [1], [2] зачастую необходимо приемный и передающий каналы разнести в пространстве. В частности, представляют практический интерес конструкции суммирующие падающую с различных направлений электромагнитную энергию нескольких источников, переизлучая её в заданном направлении. Эту задачу можно решить с помощью зеркал с несколькими фокусами. Такие зеркала, например, используются в оротронах [3]. Так в [4] для этих целей используется фокусирующее зеркало выполнено в виде трёх пересекающихся сфероцилиндрических поверхностей с одинаковым радиусом цилиндра и сферы открытого резонатора. Большой интерес такие структуры могут представлять для систем 5G. Многофокусные фокусирующие структуры можно создавать на основе неоднородного реактансного рефлектора, имеющего несколько фокусов. При этом их можно реализовывать на поверхности практически любой формы, делая их конформными. Для создания таких рефлекторов (зеркал) необходимо решить задачу синтеза. В настоящее время известны работы [5]-[14], в которых решены задачи синтеза неоднородных изотропных и анизотропных рассеивателей по заданному направлению отраженного луча на согласной [5], [7]-[11] и крессовой [12], [13] поляризациях. Известны также и работы [14], [15], посвященные разработке преобразователей поляризации отражательного типа, преобразующие линейно поляризованную падающую волну в отраженную в заданном направлении волну. В [16] решена двумерная задача синтеза изотропной импедансной поверхности произвольного сечения, возбужденной конечным числом облучателей, расположенных в заданных точках пространства, по требуемому направлению максимального излучения. В [17], [18] найдены коэффициенты отражения и решена задача синтеза двухфокусного анизотропного импедансного рефлектора произвольной формы, облучаемого двумя источниками только ортогональных поляризаций. Однако, работ посвященных решению задач синтеза изотропной поверхности произвольной формы, возбуждаемой

несколькими разнесенными в пространстве источниками, формирующей плоский фронт в заданном направлении, в литературе нет. Как нет и аналитических соотношений для коэффициентов отражения для такой плоскости, что важно для проектирования конформных многофокусных зеркал.

Поэтому целью данной работы является поиск коэффициентов отражения неоднородной анизотропной реактансной плоскости по заданным направлениям падения нескольких плоских волн и требуемым двум направлениям отражения плоской волны на ортогональных поляризациях.

Постановка задачи.

Пусть на плоскость S ($y = 0$) (рис.1,а) с направлений $\varphi_{iE,m}$ ($m = 1, 2, \dots, M$) падает M E-, а с направлений $\varphi_{iH,n}$ ($n = 1, 2, \dots, N$) - N H-поляризованных однородных плоских волн с векторами $\mathbf{E}^i, \mathbf{H}^i$:

$$H_z^i = \sum_{m=1}^M H_m^i e^{ikx \cos \varphi_{iH,m}}; \quad E_x^i = \sum_{m=1}^M \sin \varphi_{iH,m} H_m^i e^{ikx \cos \varphi_{iH,m}}, \quad (1)$$

$$E_z^i = \sum_{m=1}^N E_m^i e^{ikx \cos \varphi_{iE,m}}; \quad H_x^i = - \sum_{m=1}^N \sin \varphi_{iE,m} E_m^i e^{ikx \cos \varphi_{iE,m}}, \quad (2)$$

где E_m^i, H_m^i - комплексные амплитуды падающих волн.

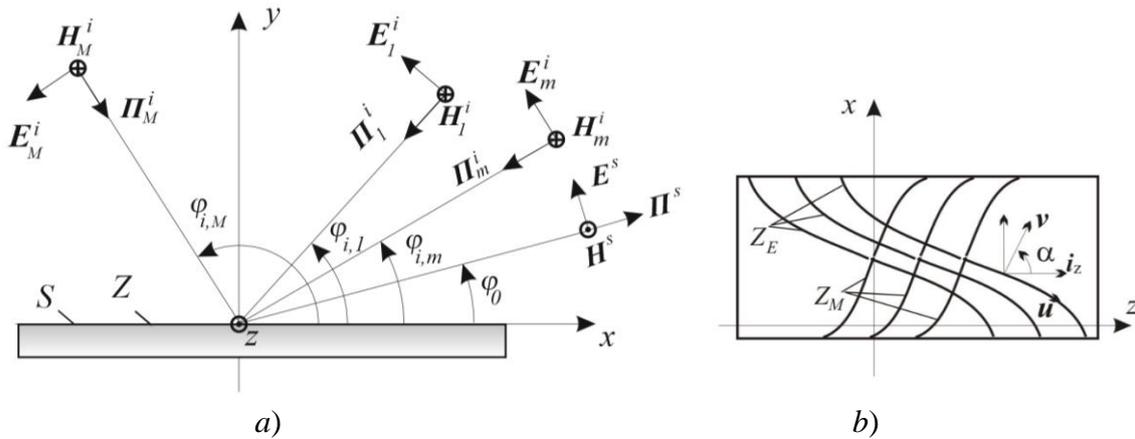


Рис.1 Постановка задачи

Пусть на плоскости S ($y=0$) выполняются анизотропные импедансные граничные условия Леонтовича:

$$[\mathbf{n}, \mathbf{E}] = -\widehat{Z} [\mathbf{n}, \mathbf{H}], \quad (3)$$

преобразующие поле падающей волны (1), (2) в однородные отраженные в двух заданных направлениях φ_E и φ_H плоские волны $\mathbf{E}^s, \mathbf{H}^s$:

$$H_z^s = H_0 e^{i\Psi_0} e^{-ik(x \cos \varphi_H + y \sin \varphi_H)}; \quad E_x^s = -\sin \varphi_H H_z^s \quad (4)$$

$$E_z^s = E_0 e^{i\Phi_0} e^{-ik(x \cos \varphi_E + y \sin \varphi_E)}; \quad H_x^s = \sin \varphi_E E_z^s, \quad (5)$$

где $E_0, H_0; \Psi_0$ и Φ_0 - амплитуды и фазы ортогональных составляющих отраженных полей. В статье вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} и компоненты тензора поверхностного импеданса \hat{Z} нормированы на характеристическое сопротивление свободного пространства $W = 120\pi$ Ом.

Необходимо найти коэффициенты отражения рассматриваемой анизотропной плоскости при заданных падающих (1), (2) и отраженных (4), (5) полях.

Коэффициенты отражения.

Введем для случая падения нескольких волн и отражении двух волн коэффициент отражения в следующей форме

$$E_z^s = P_{11}E_z^i + P_{12}H_z^i; \quad H_z^s = P_{21}E_z^i + P_{22}H_z^i. \quad (6)$$

Чтобы определить компоненты P_{sq} ($s = 1,2; q = 1,2$), необходимо представить рассеянные поля E_z^s и H_z^s через компоненты E_z^i и H_z^i падающих полей.

Пусть тензор импеданса \hat{Z} реализован частой решеткой ортогональных полос Z_E, Z_M , ориентированных под углом α к оси z (рис.1,б). В этом случае тензор импеданса в (3) будет иметь диагональный вид:

$$\hat{Z} = \begin{vmatrix} Z_E & 0 \\ 0 & Z_M \end{vmatrix}, \quad (7)$$

а компоненты векторов на плоскости S ($y = 0$) (см. рис.1б) в местной системе координат $\{\mathbf{v}, \mathbf{u}, \mathbf{n} = -\mathbf{1}_y\}$ связаны соотношениями:

$$E_v = E_x \sin \alpha + E_z \cos \alpha; \quad E_u = -E_x \cos \alpha + E_z \sin \alpha; \quad (8)$$

В соответствии с (3) и (7), граничные условия на анизотропной плоскости примут вид:

$$E_u = -Z_E H_v; \quad E_v = Z_M H_u, \quad (9)$$

которые через связи (8) преобразуются в формулы:

$$E_x \cos \alpha - E_z \sin \alpha = Z_E H_x \sin \alpha + Z_E H_z \cos \alpha; \quad (10)$$

$$E_x \sin \alpha + E_z \cos \alpha = -Z_M H_x \cos \alpha + Z_M H_z \sin \alpha. \quad (11)$$

Введем обозначения

$$E_x^i = Z_{KH} H_z^i; \quad E_z^i = -Z_{KE} H_x^i; \quad H_x^i = -\frac{E_z^i}{Z_{KE}} = -Y_{KE} E_z^i \quad (12)$$

Если падает только одна волна, то имеем

$$H_x^i = -\sum_{m=1}^N \sin \varphi_{iE,m} E_m^i e^{ikx \cos \varphi_{iE,m}}$$

$$Y_{KE} = \sin \varphi_i$$

Представляя полные поля в виде суперпозиции падающих и отраженных волн с учетом (12) и (4), (5), представим рассеянные поля через падающие поля:

$$E_z^s = \frac{\sin \varphi_H (\cos^2 \alpha Z_M + \sin^2 \alpha Z_E) Y_{KE} + Z_E Y_{KE} Z_M - \sin \varphi_H - (\cos^2 \alpha Z_E + \sin^2 \alpha Z_M)}{\Delta} E_z^i + \sin \alpha \cos \alpha \frac{(Z_M - Z_E) (\sin \varphi_H + Z_{KH})}{\Delta} H_z^i. \quad (13)$$

$$H_z^s = - \sin \alpha \cos \alpha \frac{(Z_M - Z_E) (Y_{KE} + \sin \varphi_E)}{\Delta} E_z^i - \frac{(\cos^2 \alpha Z_E + \sin^2 \alpha Z_M) + Z_E Z_M \sin \varphi_E - Z_{KH} - \sin \varphi_E (\cos^2 \alpha Z_M + \sin^2 \alpha Z_E) Z_{KH}}{\Delta} H_z^i. \quad (14)$$

Таким образом, для коэффициентов отражения имеем

$$P_{11} = \frac{\sin \varphi_H (\cos^2 \alpha Z_M + \sin^2 \alpha Z_E) Y_{KE} + Z_E Y_{KE} Z_M - \sin \varphi_H - (\cos^2 \alpha Z_E + \sin^2 \alpha Z_M)}{\Delta}, \quad (15)$$

$$P_{12} = \sin \alpha \cos \alpha \frac{(Z_M - Z_E) (\sin \varphi_H + Z_{KH})}{\Delta}, \quad (16)$$

$$P_{21} = - \sin \alpha \cos \alpha \frac{(Z_M - Z_E) (\sin \varphi_E + Y_{KE})}{\Delta}, \quad (17)$$

$$P_{22} = - \frac{(\cos^2 \alpha Z_E + \sin^2 \alpha Z_M) + Z_E Z_M \sin \varphi_E - Z_{KH} - \sin \varphi_E (\cos^2 \alpha Z_M + \sin^2 \alpha Z_E) Z_{KH}}{\Delta}, \quad (18)$$

где

$$\Delta = \sin^2 \alpha (1 + Z_E \sin \varphi_E) (\sin \varphi_H + Z_M) + \cos^2 \alpha (1 + Z_M \sin \varphi_E) (\sin \varphi_H + Z_E).$$

Диаграмма рассеяния.

В точке наблюдения $p(r, \varphi)$, расположенной в дальней зоне ($r \rightarrow \infty$), рассеянное поле можно представить в виде:

$$\begin{cases} E_z(p) \\ H_z(p) \end{cases} = H_0^{(2)}(kR) \begin{cases} F_E(\varphi) \\ F_H(\varphi) \end{cases},$$

где

$$F_E(\varphi) = \frac{k}{4} \int_{x'=-\infty}^{\infty} \{H_x + \sin \varphi E_z\} e^{ikx' \cos \varphi} dx'; \quad (19)$$

$$F_H(\varphi) = - \frac{k}{4} \int_{x'=-\infty}^{\infty} \{E_x - \sin \varphi H_z\} e^{ikx' \cos \varphi} dx' \quad (20)$$

Подставляя сюда представления составляющих векторов напряженностей полных электрического и магнитного полей E_x , E_z , H_x , H_z через коэффициенты отражения (15)–(18) и соотношения (1), (2), (4), (5), получим

$$F_E(\varphi) = \frac{k}{4} \int_{x=-\infty}^{\infty} \{(\sin \varphi - Y_{KE} + (\sin \varphi_E + \sin \varphi) P_{11}) E_z^i + (\sin \varphi + \sin \varphi_E) P_{12} H_z^i\} e^{ikx \cos \varphi} dx \quad (21)$$

$$F_H(\varphi) = \frac{k}{4} \int_{x=-\infty}^{\infty} \{(\sin \varphi_H + \sin \varphi)P_{21}E_z^i + (\sin \varphi - Z_{KH} + (\sin \varphi_H + \sin \varphi)P_{22})H_z^i\} e^{ikx \cos \varphi} dx \quad (22)$$

Полученные выражения справедливы для коэффициентов отражения анизотропной импедансной плоскости, обеспечивающее переотражение нескольких плоских волн различных поляризаций в двух заданных направлениях разных направлениях на ортогональных поляризациях. Закон распределения компонент тензора импеданса (7), входящих в формулы (21), (22), предстоит ещё определить в результате решения задачи синтеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-19-10537-П) в ЦКП «Прикладная электродинамика и антенные измерения» ЮФУ, г. Таганрог.

Литература

1. Фролов О.П., Вальд В.П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 496 с.
2. Шишлов А.В. Теория и техника многозеркальных антенн. – Журнал «Антенны», 2009, Выпуск 7 (146), стр. 14-29. УДК 621.396.67.
3. Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю. // Известия вузов, сер. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т.20, №3. С.81.
4. Соловьёв А.Н., Мясин Е.А. // Труды 18-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2008. Т.1. С. 194.
5. Петров Б.М., Юханов Ю.В. Обратная задача рассеяния для импедансного цилиндра произвольного сечения // Изв. вузов Радиоэлектроника. - 1980.-Т.23.-№9.-С.78-81.
6. Петров Б.М., Шарварко В.Г. Приближенное решение обратной задачи рассеяния для круглого импедансного цилиндра // Рассеяние электромагнитных волн. - Таганрог, 1976. Вып.41. – С.11-24.
7. Петров Б.М., Юханов Ю.В. Синтез двумерного реактивного рефлектора // Изв. вузов Радиоэлектроника. - 1980.-Т.23.-№9.-С.59-63.
8. Юханов Ю.В. Analysis and synthesis of an impedance plane // Radiotekhnika i Elektronika. 2000. Pp. 404-409.
9. Whites K.W., Mittra R. “A systematic study of the impedance boundary condition (EM scattering)”. Antennas and Propagation Society International Symposium, 1990. AP-S. Merging Technologies for the 90's. Digest. 1990, pp. 870 –и 873 vol.2, DOI: 10.1109/APS.1990.115246.
10. Smith P. D., Rawlins A. D. “Diffraction from structures with an impedance boundary”. 2013 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), pp. 1297 - 1300, DOI: 10.1109/ICEAA.2013.6632459.
11. Yukhanov Y.V., Privalova T.Y. “Synthesis of Nonstationary Plane by a Given Frequency Spectrum of the Reflected Field”. 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Year: 2015, pp. 521 - 524, DOI: 10.1109/ICEAA.2015.7297169.
12. Yukhanov Y. V. “Synthesis of anisotropic impedanceplane”, 4th International Conference on Antenna Theory and Techniques (Cat. No.03EX699) Volume: 1, pp. 121 – 124. vol.1, DOI: 10.1109/ICATT.2003.1239164.

13. Yukhanov Y. V., Privalova T.Y. "Synthesis of Impedance of Axisymmetric Body". 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC). Year: 2013/ pp. 582 - 584, DOI: 10.1109/APMC.2013.6694871.
14. Yukhanov Y.V., Privalova T.Y. Synthesis of impedance reflection type polarizer". 2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR). Year: 2016, pp. 1- 4,DOI: 10.1109/TELFOR.2016.7818848.
15. Privalova T.Yu. "Synthesis of Impedance Polarization Rotator of Reflective Type"//Proceedings of 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP) July 26-29, 2016 in Kaohsiung, Taiwan// <http://apcap2016.org/callforpapers.html>/ pp.233-234.
16. Yukhanov Y. V., Privalova T. Y. Synthesis of impedance surface excited by irradiators system//2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136784.Year: 2015.Pages: 1 – 4.
17. Yukhanov Y.V., Privalova T.Y. Reflection coefficient of inhomogeneous anisotropic impedance plane// 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Fall, PIERS - FALL 2017. ISBN: 978-1-5386-1212-5. DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293432 C. 1816-1822.
18. Y. V. Yukhanov ; T. Y. Privalova ; T. O. Amirokov ; E. E. Privalov Synthesis of a Two-Focal Impedance Reflector of Arbitrary Shape //Published in: 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). DOI: 10.23919/PIERS.2018.8597828. Page s: 1591 - 1596.