

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАЗВЯЗЫВАЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ В ВИДЕ ИМПЕДАНСНОЙ ПОЛОСЫ НА ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛОСКОСТИ

THE TASK OF PARAMETER OPTIMISATION OF A DECOUPLING STRUCTURE IN THE FORM OF AN IMPEDANCE STRIP AT A CONDUCTIVE PLANE

Аннотация. Получены формулы, определяющие величину импеданса и местоположение полоски, обеспечивающих максимальное значение коэффициента подавления. Определено неоднородное распределение импеданса, обеспечивающего большее значение коэффициента подавления по сравнению с однородным распределением импеданса.

Summary. Formulae, determining the value of impedance and location of a strip, that secure the maximum value of the depression coefficient, have been worked out. Non-uniform distribution of impedance that provides for a greater value of depression coefficient as compared to uniform distribution of impedance has been determined.

Проблема оптимизации (синтеза) распределения импеданса рассматривается при разработке антенн поверхностных волн [1] и развязывающих структур [2, 3].

Одним из возможных методов уменьшения взаимной связи между приемной и передающей антеннами, расположенными на общей (обычно хорошо проводящей) поверхности, является применение импедансных структур [4]. В [2] отмечается, что “суть этого метода состоит в том, что при определенных условиях импедансная структура “отжимает” поле от своей поверхности, уменьшая тем самым количество энергии, поступающей в приемную антенну”.

В [3] проведен анализ развязывающих свойств однородной импедансной полоски, расположенной на идеально проводящей плоскости. При этом показано, что развязка между приемной и передающей антеннами зависит как от реактивной, так и от активной составляющих комплексного поверхностного импеданса $\dot{\rho}(y)$ на полосе.

Как развязывающие устройства, так и импедансные структуры иного назначения достаточно часто реализуются в виде ребристой структуры, представляющей собой канавки, прорезанные в проводящей плоскости. Широкое применение ребристых структур связано с тем, что, изменяя геометрические характеристики ребристой структуры, можно в достаточно больших пределах менять величину ее эквивалентного поверхностного импеданса [3].

В [2] в строгой электродинамической постановке рассмотрена двумерная задача о связи волноводных антенных решеток, в плоскости апертур которых расположена ребристая структура. При этом рассмотрены зависимости величины связи от характеристик структуры (ширины и глубины системы параллельных канавок) и ее местоположения относительно решеток.

В [4] проведен численный анализ развязывающих свойств импедансной полоски с чисто реактивным импедансом.

Однако при реализации поверхностного импеданса нерешенными являются такие вопросы как зависимость развязывающих свойств структуры от ширины импедансной структуры и распределения неоднородного поверхностного импеданса на ней. Решение этих вопросов позволяет проводить расчеты по выбору параметров развязывающей структуры при практической реализации.

Целью настоящей работы является решение задачи оптимизации величины импеданса и местоположения одиночной элементарной импедансной полоски, расположенной на проводящей плоскости, обеспечивающих максимальную развязку между источником (нитью стороннего магнитного тока единичной амплитуды) и приемной антенной.

1. Математическая модель задачи. Рассмотрим следующую двумерную задачу. Пусть имеется идеально проводящая бесконечная плоскость, совпадающая с плоскостью XOY декартовой системы координат. Рассмотрим на этой плоскости полосу d шириной t_d , на которой задан сторонний нормированный поверхностный импеданс $\dot{\rho}_n(y) = \dot{\rho}(y)\sqrt{\varepsilon_a/\mu_a}$, где ε_a, μ_a – абсолютные диэлектрическая и магнитная постоянные верхнего полупространства $z > 0$. Пусть слева от полоски d (при $z = 0, y = 0$) расположен сторонний источник – нить магнитного тока единичной амплитуды, а справа находится полоса δ шириной t_δ , в пределах которой задано значение импеданса $\dot{\rho}_n(y) = 1 -$

апертура приемной антенны. Разобьем интервал $[0, T]$, где $T = t_d + t_\delta$, на N элементарных полосок Δ шириной t_Δ . Распределение поверхностного импеданса на полосе d аппроксимировалось кусочно-постоянной функцией

$$\dot{\rho}_n(y) = \sum_{n=1}^N \dot{\rho}_n l_n(y), \quad (1)$$

где

$$l_n(y) = \begin{cases} 1, & y \in [(n-1)\Delta, n\Delta] \\ 0, & y \notin [(n-1)\Delta, n\Delta] \end{cases}, \quad n = 1, 2, \dots, N-1, \quad l_N(y) = \begin{cases} 1, & y \in [(N-1)\Delta, N\Delta] \\ 0, & y \notin [(N-1)\Delta, N\Delta] \end{cases},$$

$$\dot{\rho}_n = \dot{\rho}_n(y_n),$$

где y_n – координата середины элементарной полоски.

Рассмотрим элементарную импедансную полоску Δ , расположенную на полосе d (рис. 1), со значением поверхностного импеданса $\dot{\rho}_n(y_n)$.

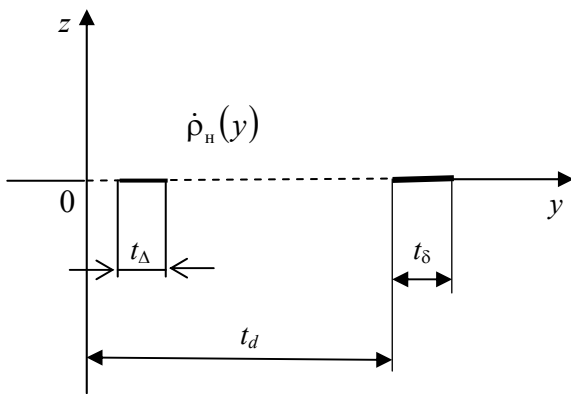


Рисунок 1 – Геометрия задачи

Требуется найти величину этого импеданса и местоположение элементарной полоски Δ , при которых величина развязки между источником и приемной антенной будет максимальна.

Известно, что величина развязки пропорциональна коэффициенту подавления, который определяется следующей формулой [3]:

$$\eta = \frac{\int_0^T |J(y'; \dot{\rho}_0(y'))|^2 dy'}{\int_{t_d}^T |J(y'; \dot{\rho}_n(y'))|^2 dy'}, \quad (2)$$

где $\dot{\rho}_0(y') = 0$.

Комплексная амплитуда плотности электрического тока $J(y'; \dot{\rho}_n(y))$ удовлетворяет следующему интегральному уравнению Фредгольма второго рода [4]:

$$J(y; \dot{\rho}_n(y)) + \frac{k}{2} \int_0^T \dot{\rho}_n(y') J(y'; \dot{\rho}_n(y')) \dot{H}_0^{(2)}(k|y - y'|) dy' = -\frac{\omega \epsilon_a}{2} \dot{H}_0^{(2)}(k|y - y_0|), \quad (3)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; $\dot{H}_0^{(2)}(\xi)$ – функция Ханкеля второго рода нулевого порядка.

Рассмотрим функционал следующего вида:

$$\Phi(J) = \int_{t_d}^T |J(y'; \dot{\rho}_n(y'))|^2 dy'. \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что функционал (4) совпадает со знаменателем выражения (2) и определяет норму тока на полосе δ . Отсюда следует, что необходимо найти такое распределение поверхностного импеданса на полосе d , которое обеспечит минимум функционала (4) и максимальную развязку между источником и приемной антенной.

2. Вывод формулы, определяющей величину импеданса и местоположение элементарной полоски, обеспечивающих максимальную развязку. Пусть на полосе d поверхностный импеданс не равен нулю только на одной (n -ой) элементарной полоске шириной t_Δ .

Выясним при какой величине импеданса на ней норма тока (функционал (4)) на интервале $[t_d, T]$ будет минимальной. Для этого необходимо вначале найти плотность тока на этой полосе. Плотность электрического тока определялась путем решения уравнения (3) с использованием

рекуррентных формул, предложенных в [6]. Точность такого решения соответствует точности решения уравнения (3) методом Крылова-Боголюбова [5].

В рассматриваемом случае плотность тока на полосе удовлетворяет следующему уравнению [7]:

$$J_1(y) = \dot{F}(y, y_0) - \frac{\dot{\rho}_n \dot{F}(y_n, y_0)}{1 + \dot{\rho}_n \dot{h}_n(y_n)} \dot{h}_n(y), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

где $\dot{h}_n(y) = \frac{k}{2} \int_{(n-1)\Delta}^{n\Delta} \dot{H}_0^{(2)}(k|y - y'|) dy'$.

При этом функция $\dot{F}(y, y_0)$ определяется следующей формулой:

$$\dot{F}(y, y_0) = -\frac{\omega \varepsilon_a}{2} \dot{H}_0^{(2)}(k|y - y_0|. \quad (6)$$

Введем обозначение $\dot{h}(0) = \dot{h}_n(y_n)$.

С учетом этого обозначения соотношение (5) примет следующий вид:

$$J_1(y) = \dot{F}(y; y_0) - \frac{\dot{F}(y_n; y_0)}{1 + \dot{\rho}_n \dot{h}(0)} \dot{\rho}_n \dot{h}_n(y). \quad (7)$$

Из (7) видно, что плотность тока зависит как от величины импеданса ρ_n на элементарной полоске Δ , так и от ее местоположения на полосе d , т.е. от y_n .

Выясним, при какой величине импеданса $\dot{\rho}_n(y_n)$ коэффициент подавления η принимает максимальное значение (при фиксированном y_n). При этом будем считать, что $\dot{\rho}_n(y_n) = \dot{\rho}_n = i\zeta_n$, где $\zeta_n = \text{Im}(\dot{\rho}_n(y_n))$ - действительное число. Запишем функционал (4) в явном виде:

$$\begin{aligned} \int_{t_d}^T |J(y')|^2 dy' &= \int_{t_d}^T |\dot{F}(y'; y_0)|^2 dy' + \int_{t_d}^T \frac{\dot{F}(y'; y_0) \dot{F}^*(y_n; y_0)}{1 - i\zeta_n \dot{h}^*(0)} i\zeta_n \dot{h}_n^*(y') dy' - \\ &- \int_{t_d}^T \frac{\dot{F}^*(y'; y_0) \dot{F}(y_n; y_0)}{1 + i\zeta_n \dot{h}(0)} i\zeta_n \dot{h}_n(y') dy' + \int_{t_d}^T \frac{|\dot{F}(y_n; y_0)|^2}{|1 + i\zeta_n \dot{h}(0)|^2} \zeta_n^2 |\dot{h}_n(y')|^2 dy', \end{aligned} \quad (8)$$

где $J^*(y')$, $\dot{F}^*(y'; y_0)$, $\dot{h}_n^*(y')$ - комплексно-сопряженные функции.

Введем следующие обозначения:

$$\dot{A}_n = \dot{F}^*(y_n; y_0) \int_{t_d}^T \dot{F}(y'; y_0) \dot{h}_n^*(y') dy', \quad B_n = |\dot{F}(y_n; y_0)|^2 \int_{t_d}^T |\dot{h}_n(y')|^2 dy'.$$

С учетом введенных обозначений соотношение (8) примет следующий вид:

$$\int_{t_d}^T |J(y')|^2 dy' = \int_{t_d}^T |\dot{F}(y'; y_0)|^2 dy' + \dot{A}_n \frac{i\zeta_n}{1 - i\zeta_n \dot{h}^*(0)} - \dot{A}_n^* \frac{i\zeta_n}{1 + i\zeta_n \dot{h}(0)} + B_n \frac{\zeta_n^2}{|1 + i\zeta_n \dot{h}(0)|^2}. \quad (9)$$

Найдем экстремумы нормы тока на полосе d . Для этого возьмем производную (по ζ_n) от выражения (9). Получим

$$\frac{\partial}{\partial \zeta_n} \left[\int_{t_d}^T |J(y')|^2 dy' \right] = \dot{A}_n \frac{i}{[1 - i\zeta_n \dot{h}^*(0)]^2} - \dot{A}_n^* \frac{i}{[1 + i\zeta_n \dot{h}(0)]^2} + B_n \frac{2\zeta_n + i\zeta_n^2 [\dot{h}(0) - \dot{h}^*(0)]}{|1 + i\zeta_n \dot{h}(0)|^4}. \quad (10)$$

Приравнявая соотношение (10) к нулю, после несложных преобразований получим квадратное уравнение следующего вида:

$$\zeta_n^2 [\dot{A}_n^* \dot{h}^*(0)^2 - \dot{A}_n \dot{h}(0)^2 + B_n \dot{h}(0) - B_n \dot{h}^*(0)] + i\zeta_n [2\dot{A}_n^* \dot{h}^*(0) + 2\dot{A}_n \dot{h}(0) - 2B_n] + \dot{A}_n - \dot{A}_n^* = 0.$$

Корни данного уравнения выражаются следующей формулой:

$$\zeta_{n1,n2} = \frac{2 \operatorname{Re}(\dot{A}_n \dot{h}(0)) - B_n}{2[B_n \operatorname{Im}(\dot{h}(0)) - \operatorname{Im}(\dot{A}_n \dot{h}(0)^2)]} \times \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \operatorname{Im}(\dot{A}_n) [B_n \operatorname{Im}(\dot{h}(0)) - \operatorname{Im}(\dot{A}_n \dot{h}(0)^2)]}{[B_n - 2 \operatorname{Re}(\dot{A}_n \dot{h}(0))]^2}} \right]. \quad (11)$$

Формула (11) позволяет вычислить величину импеданса на n -й элементарной полоске, которая обеспечивает максимальную (либо минимальную) развязку между источником и приемной антенной при фиксированном местоположении этой полоски.

В результате проведенных расчетов было выяснено, что если в последней формуле выбрать отрицательный знак, то норма тока будет минимальной, при этом величина коэффициента подавления будет максимальной.

Таким образом, величина импеданса, при которой достигается максимальная развязка, определяется следующей формулой:

$$\dot{\rho}_n(y_n) = i \frac{2 \operatorname{Re}(\dot{A}_n \dot{h}(0)) - B_n}{2[B_n \operatorname{Im}(\dot{h}(0)) - \operatorname{Im}(\dot{A}_n \dot{h}(0)^2)]} \times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \operatorname{Im}(\dot{A}_n) [B_n \operatorname{Im}(\dot{h}(0)) - \operatorname{Im}(\dot{A}_n \dot{h}(0)^2)]}{[B_n - 2 \operatorname{Re}(\dot{A}_n \dot{h}(0))]^2}} \right]. \quad (12)$$

Еще раз отметим, что величина $\dot{\rho}_n(y_n)$ зависит от местоположения элементарной полоски Δ на полосе d .

В общем случае аналитически не удается выяснить характер импеданса, который обеспечивает максимальную развязку. Поэтому были проведены численные расчеты величины импеданса с использованием формулы (12), которые показали, что минимум нормы тока элементарной полоской достигается в том случае, когда чисто реактивный импеданс имеет индуктивный характер.

3. Обсуждение результатов. Для определения величины импеданса и местоположения полоски, обеспечивающих максимальное значение коэффициента подавления η были проведены численные расчеты при разных значениях t_d и различном количестве элементарных полосок, расположенных на этой полосе. Значения t_d изменялись в пределах от 1λ до 5λ . Количество полосок изменялось от 30 до 150.

Для случая $t_d = 3\lambda$, $N = 91$ и $t_s = t_\Delta$ в качестве примера на рис. 2 приведены зависимости значений $\operatorname{Im}(\dot{\rho}_n(y_n))$ (пунктирная линия) и η (сплошная линия) от y_n/λ , где n – номер элементарной полоски.

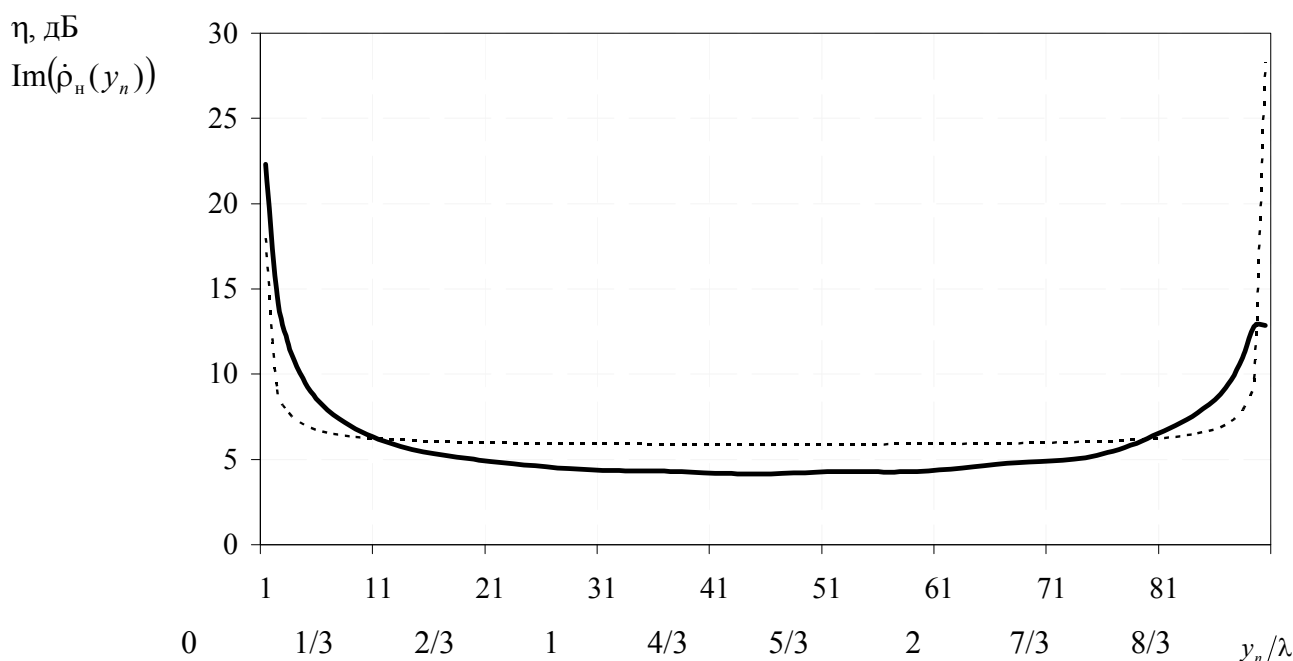


Рисунок 2 – Зависимость величины $\operatorname{Im}(\dot{\rho}_n(y_n))$ и коэффициента подавления η от местоположения элементарной полоски y_n/λ

Проведенные расчеты показывают, что:

– величина $\text{Im}(\dot{\rho}_n(y_n))$, обеспечивающая максимальное значение η , положительна при всех y_n и t_d ;

– $\text{Im}(\dot{\rho}_n(y_n))$ максимальна в тех случаях, когда элементарная импедансная полоска расположена непосредственно вблизи источника ($\eta = 22,3$ дБ), либо вблизи апертуры приемной антенны ($\eta = 12,9$ дБ);

– характер изменения $\text{Im}(\dot{\rho}_n(y_n))$ при различных значениях t_d практически одинаков.

Для случая $t_d = 4\lambda$, $N = 161$ и $t_\delta = t_\Delta$ была рассмотрена следующая задача:

Положение одной полоски фиксировалась непосредственно вблизи источника, при этом определялась оптимальная величина импеданса $\dot{\rho}_n(y_n)$ этой полоски. В этом случае достигалось максимальное значение коэффициента подавления $\eta = 23,5$ дБ. Затем учитывалась вторая элементарная полоска, импеданс которой также выбирался в соответствии с формулой (12). Рассчитывалась величина коэффициента подавления η при различном местоположении второй полоски.

В результате оказалось, что максимальное значение коэффициента подавления $\eta = 31,22$ достигается, если вторая элементарная импедансная полоска расположена непосредственно у приемной антенны, т.е. когда $y_n/\lambda = 4$.

Далее аналогичным образом рассматривались задачи нахождения величины импеданса и местоположения трех и большего числа элементарных полосок, обеспечивающих максимальное значение η .

В результате решения этих задач оказалось, что увеличение числа элементарных полосок приводит к значительному росту коэффициента подавления, который достигает 79 дБ при восьми элементарных полосках. Дальнейшее увеличение количества этих полосок не приводит к увеличению величины η .

Результаты, полученные при решении задач оптимизации величины импеданса и местоположения элементарной полоски, показывают, что неоднородное распределение поверхностного импеданса на полосе d позволяет достичь значения коэффициента подавления как минимум на 30 дБ больше, чем однородное распределение импеданса на той же полосе [8].

Получение формулы (12) для решения интегрального уравнения (3), позволяющей определить величину поверхностного импеданса и местоположение элементарной полоски, обеспечивающих максимальную развязку, оказалась возможным только при использовании рекуррентных формул [7]. Это, в свою очередь, упрощает решение задачи синтеза, рассмотренной в данной работе.

В заключение отметим следующие результаты:

1. Получена формула, позволяющая определить величину импеданса и местоположение элементарной полоски, обеспечивающих максимальную развязку.

2. Показано, что максимальное значение коэффициента подавления достигается в том случае, если импеданс элементарной полоски имеет индуктивный характер и эта полоска расположена непосредственно вблизи источника.

3. Определено, что неоднородное распределение поверхностного импеданса на полосе шириной $t_d = 4\lambda$ позволяет достичь значения коэффициента подавления как минимум на 30 дБ больше, чем однородное распределение импеданса на той же полосе.

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при реализации импедансных развязывающих структур.

Литература

1. Терешин О.Н., Седов В.М., Чаплин А.Ф. Синтез антенн на заземляющих структурах. – М.: Связь, 1980.
2. Кюркчан А.Г. Связь между антеннами в присутствии ребристых структур // Радиотехника и электроника, АН СССР, 1985. – Т.22. – № 7. – С. 1362.
3. Цалиев Т.А., Черенков В.С. Анализ развязывающих свойств однородной импедансной полосы, расположенной на бесконечном экране // Радиотехника и электроника: АН СССР. – № 1, 1985.

4. *Марков Г.Т., Чаплин А.Ф.* Возбуждение электромагнитных волн. – М.: Радио и связь, 1983.
5. *Гладких В.И.* Численная оценка точности рекуррентного метода задачи возбуждения неоднородной импедансной плоскости // *Праці УНДІРТ.* – 2001. – №4. – С. 71-73.
6. *Черенков В.С., Гладких В.И.* Анализ развязывающих свойств ребристой структуры // *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова.* – 2003. – №2. – С. 43-48.
7. *Черенков В.С.* Рекуррентные формулы в задачах дифракции волн на неоднородной импедансной плоскости // *Наукові праці УДАЗ ім. О.С.Попова.* – 2000. – №1. – С. 42-46.
8. *Гладких В.И. Черенков В.С.* Анализ развязывающих свойств ребристой структуры с поглощением. // *Сб. докладов. Телеком-2003. 6-я Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы телекоммуникаций».* – Ч. 2, Украина. – С.54-56.