

УДК 621.396.67

В. И. ЗАМЯТИН, Л. В. ГОЛОВИНА, Н. В. ЩЕРБАКОВ

СИНТЕЗ МНОГОСЛОЙНЫХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ УКРЫТИЙ С ЗАДАННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В последнее время резко возросли требования, предъявляемые к работе радиотехнических средств, в условиях различных неблагоприятных воздействий. Эффективным средством защиты от этих воздействий являются многослойные радиопрозрачные укрытия или обтекатели. Однако они также являются достаточно сложными и поэтому дорогими конструкциями, что, очевидно, приводит к необходимости их оптимального проектирования. Сложность задачи такого проектирования обусловлена тем, что к радиопрозрачным укрытиям (РПУ) предъявляется целый ряд различных по физической природе и взаимно противоречивых требований.

Во-первых, это требования к электрическим характеристикам. В простейшем случае это обеспечение коэффициента прохождения

(радиопрозрачности) не ниже требуемого. При этом зачастую полоса пропускания укрытия заметно шире рабочей полосы защищаемого устройства, поэтому к частотным свойствам РПУ специальных требований не предъявляется. Однако все более широкое применение широкополосных сигналов, необходимость перестройки в широком диапазоне частот, а также обеспечение возможности размещения под РПУ нескольких разночастотных антенн накладывают довольно жесткие требования на радиопрозрачность уже в определенной, подчас весьма широкой полосе частот * или на многих фиксированных частотах. Учитывая, что многослойная диэлектрическая стенка из большого количества слоев (7—10 и более) может обеспечить достаточно сильную зависимость коэффициента прохождения от частоты, в ряде случаев целесообразно конструировать РПУ, специально обеспечивающее и предварительную частотную селекцию сигналов. Такой подход может повысить избирательность, снизить уровень внеполосных излучений, а следовательно, повысить скрытность и облегчить решение задач электромагнитной совместимости укываемых устройств.

Сказанное означает, что задача оптимизации параметров РПУ должна решаться в заданном диапазоне частот. Во-вторых, это требования чисто конструктивные, механические, к которым можно отнести следующее.

— Укрытие должно обеспечивать эффективную защиту антенны от внешних воздействий. Поэтому внешний слой конструкции должен быть не тоньше определенной величины.

— Общий вес, а следовательно, и стоимость должны находиться в разумных пределах.

Кроме того, в настоящее время промышленность освоила выпуск диэлектриков с весьма ограниченным набором диэлектрических проницаемостей, представленным достаточно небольшим дискретным рядом.

Таким образом, задача синтеза стенки радиопрозрачного многослойного РПУ сводится к отысканию количества слоев, их толщин и диэлектрических проницаемостей материалов, при наличии ограничений на толщину первого слоя, общую толщину многослойника, а в некоторых случаях и на диэлектрическую проницаемость материалов, обеспечивающих оптимальность (по некоторому критерию качества) коэффициента прохождения в заданной полосе частот.

В качестве критериев оптимальности могут быть использованы различные функции, связанные с коэффициентом прохождения, и определяющие качество функционирования РПУ в системе. Рассмотрим некоторые из них.

Наиболее простым и, следовательно, наиболее часто встречающимся является критерий максимума коэффициента радиопрозрачности в данной полосе частот, в среднеквадратическом либо Чебышевском приближении. При этом, очевидно, среднеквадрати-

* Большими считаются изменения частоты, в пределах которых коэффициент радиопрозрачности многослойника может существенно изменяться.

ческое приближение более предпочтительно в тех случаях, когда укрываемое радиотехническое средство работает с широкополосными сигналами, а несущая частота не перестраивается. В этом случае наличие узких провалов в зависимости коэффициента прохождения от частоты не оказывает существенного влияния на результирующую, проходящую через РПУ, мощность, а критерий оптимальности выглядит так:

$$\max \kappa = \max_{\vec{x}} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \dot{T} \dot{T}^* (\vec{x}, \omega) d\omega, \quad (1)$$

где \dot{T} — комплексный коэффициент прохождения; \vec{x} — вектор искомых параметров; ω — частота; ω_{\max} , ω_{\min} — пределы изменения частоты.

Если радиотехническое средство работает со сравнительно узкополосным спектром, но несущая частота перестраивается в больших пределах, $\dot{T}(\vec{x}, \omega)$ не должен иметь даже узких провалов и поэтому более естественным в данной ситуации является минимаксный критерий оптимальности многослойника

$$\max_{\vec{x}} \kappa = \max_{\vec{x}} \min_{\omega} \dot{T} \dot{T}^* (\vec{x}, \omega). \quad (2)$$

Необходимость обеспечения частотной селекции приводит к тому, что наряду с зонами радиопрозрачности должны существовать и зоны, в которых коэффициент радиопрозрачности минимален.

Традиционно первым является критерий близости коэффициента радиопрозрачности многослойника к заданному как в пределах полосы радиопрозрачности, так и в пределах зоны подавления

$$\min_{\vec{x}} \kappa = \min_{\vec{x}} \max_{\omega} |G(\omega) - \dot{T} \dot{T}^* (\vec{x}, \omega)|, \quad (3)$$

где $G(\omega)$ — требуемая форма квадрата модуля коэффициента радиопрозрачности в диапазоне частот;

$$G(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } \omega \in \Omega_{\text{пр}}; \\ 0, & \text{если } \omega \in \Omega_{\text{под}}; \end{cases}$$

$\Omega_{\text{пр}}$ — область радиопрозрачности многослойника; $\Omega_{\text{под}}$ — область подавления многослойника.

Для обеспечения более высокого подавления или же для обеспечения оптимального соотношения между коэффициентом радиопрозрачности в полосе пропускания и вне ее может быть введена весовая функция, обеспечивающая более высокий или более низкий уровень аппроксимации в разных точках диапазона

$$\min_{\vec{x}} \kappa = \min_{\vec{x}} \max_{\omega} W(\omega) |G(\omega) - \dot{T} \dot{T}^* (\vec{x}, \omega)|. \quad (4)$$

Хорошее соотношение между коэффициентом радиопрозрачности в зоне радиопрозрачности и в зоне подавления, в ряде практически

важных случаев может обеспечить критерий, который можно назвать условно критерием максимума отношения сигнал-шум

$$\max \kappa = \max_{\omega(\Omega_{\text{пр}})} \frac{\min \vec{T}T^*(x, \omega)}{\max_{\omega(\Omega_{\text{под}})} \vec{T}T^*(x, \omega) + P}, \quad (5)$$

где P — учитывает внутренние характеристики укрываемого радиотехнического средства (например, уровень шумов системы антенна—радиоприемник).

Рассмотренные выше критерии позволяют получить оптимальные многослойники практически для всех существующих в настоящее время режимов функционирования радиотехнических средств. Не вдаваясь в подробности границ применимости тех или иных критериев, рассмотрим некоторые из них. Следует отметить, что все рассмотренные ниже критерии при бесконечном числе степеней свободы приводят к практически одинаковым результатам. Однако при небольшом количестве слоев многослойника результаты могут иметь существенное различие.

Для того, чтобы воспользоваться каким-то из критериев, необходимо прежде всего знание.

Выражение для коэффициента радиопрозрачности системы слоев диэлектрика определяется методом рекуррентных формул [1] следующим образом.

Исходя из закона Снеллиуса, рассчитываются углы преломления Θ_j :

$$\sqrt{\epsilon_j} \sin \Theta_j = \sqrt{\epsilon_{n+1}} \sin \Theta_{n+1},$$

где ϵ_j — диэлектрическая проницаемость j -го слоя, может быть комплексной величиной; Θ_{n+1} — угол падения плоской электромагнитной волны на слонстую систему.

Определяются импедансы слоев Z_j : $Z_j = \frac{1}{\sqrt{\epsilon} \cos \Theta_j}$ — для перпендикулярной поляризации;

$Z_j = \frac{\cos \Theta_j}{\sqrt{\epsilon}}$ — для параллельной поляризации, и входные импедансы $Z_{\text{вх}}$, $Z_{\text{вх}} = Z_1$, а далее по рекуррентной формуле

$$Z_{\text{вх}}^j = \frac{Z_{\text{вх}}^{j-1} - iZ_j \operatorname{tg}(2\pi d_j \sqrt{\epsilon_j} \cos \Theta_j / \lambda)}{Z_j - iZ_{\text{вх}}^{j-1} \operatorname{tg}(2\pi d_j \sqrt{\epsilon_j} \cos \Theta_j / \lambda)} Z_j,$$

где d_j — толщина j -го слоя; λ — длина волны.

Находятся входные импедансы (с учетом переотражений от всех последующих слоев), а затем и коэффициент прохождения:

$$\vec{T} = \prod_{j=1}^N \frac{(Z_{\text{вх}}^j + Z_j)}{(Z_{\text{вх}}^j + Z_{j+1})} \exp(j2\pi d_j \cos \Theta_j \sqrt{\epsilon_j} / \lambda).$$

Таким образом, мы имеем выражение для коэффициента радиопрозрачности многослойника как функцию ϵ_j и d_j слоев.

При этом на ϵ_j и d_j могут накладываться следующие ограничения: $\epsilon_{j \min} < \epsilon_j < \epsilon_{j \max}$, $d_{i \min} < d_i < d_{i \max}$, кроме того, ограничения могут накладываться на общую толщину многослойника $\sum d_{j \min} < \sum d_j < \sum d_{j \max}$. Учитывая, что выражение для градиента коэффициента радиопрозрачности может быть получено в явном виде, для решения задачи оптимизации по одному из перечисленных выше критериев целесообразно воспользоваться одним из методов поиска экстремумов первого порядка.

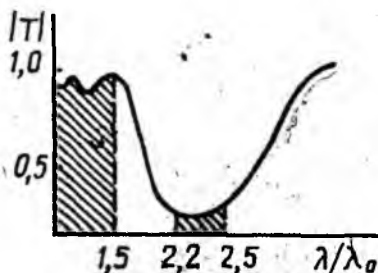
Для решения задачи оптимизации в среднеквадратическом приближении это может быть градиентный метод, а в Чебышевском приближении — метод ϵ — наискорейшего спуска [2].

В качестве примера применения изложенной выше методики рассмотрим задачу синтеза стенки РПУ, обеспечивающей радиопрозрачность в диапазоне длин волн от $\lambda_0 = 0$ до $\lambda_0 = 1,5$ и подавление в диапазоне $\lambda_0 = 2,2 \div \lambda_0 = 2,5$. При этом будем полагать, что многослойная структура состоит из N слоев диэлектрика с заданными диэлектрическими проницаемостями ϵ_j . Необходимо определить толщины всех слоев, обеспечивающие наибольшее отношение сигнал-шум (5).

Результаты расчета при $N=5$ и $\epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_5=4$; $\epsilon_2, \epsilon_4=1,2$ приведены на рисунке.

В полосе радиопрозрачности рассматриваемый многослойник обеспечивает коэффициент прохождения не ниже 0,89, а в полосе подавления — не больше 0,3. Выбранная конструкция многослойника является весьма простой и обычно используется только для обеспечения механической защиты радиотехнического средства при сравнительно высоком коэффициенте прохождения в полосе прозрачности. В то же время, как видно из рисунка, такая конструкция без заметных потерь коэффициента прохождения в полосе прозрачности может существенно (примерно 5 дБ) снизить уровень не совпадающих по частоте помех. Это подтверждает практическую значимость рассмотренной методики. Очевидно, что увеличение числа слоев позволит существенно улучшить его эд.

Таким образом, рассматривать как характерные и (на базе большого количества) обеспечивающие высокую пропускания и подавлен



Список литературы: 1. Бреховский Л. В. Волны в неоднородных средах. М., 1973. 198 с. 2. Дельянов В. Ф., Малоземов В. Н. Вспомогательные функции. М., 1972. 170 с.

1993

Поступила в редакцию 20.07.90

Радиотехника

621.396(06)



P 15

МБ ХМУРЕ

оптими-
гу, так
ия, обе-
полосе
полосы.