УДК 531

В. В. Козловский, А. В. Яровой, Д. О. Сопильняк

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Анотацыя. В данной статье представлено то как могут располагаться резонансные частоты диэлектрических слоёв. Решение этой задачи позволит ответить и на другой важный вопрос: как могут располагаться частотные зоны поглощения (а следовательно и отражения) и какова их ширина. В предлагаемой статье даётся решение сформулированной выше задачи для простейшего интерференционного покрытия и следствия решения.

Ключевые слова: эффективная площадь отражения, резонансное возбуждение кристаллической структуры, радиопоглощающее покрытие.

Как известно [1] мощным средством защиты телекоммуникационной аппаратуры являются защитные радиомаскировочные покрытия. Для уменьшения эффективной площади рассеяния объектов телекоммуникаций широко применяются покрытия интерференционного типа [1]. Центральная частота области поглощения электромагнитной энергии определяется резонансной частотой самого покрытия, то есть диэлектрическим слоем. При резонансе поверхностное сопротивление резистивной плёнки трансформируется диэлектрическим слоем в волновое сопротивление свободного пространства. В результате электромагнитная энергия поглощается в резистивной плёнке покрытия. Поскольку диэлектрический слой является многорезонансной системой, то и интерференционное покрытие имеет бесконечное число областей поглощения и отражения. Физически ясно, что для расширения частотной области поглощения желательно иметь диэлектрический слой, резонансные частоты которого близко расположены друг к другу. Тогда из-за наличия резистивной плёнки и собственных диэлектрических потерь амплитудно-частотные характеристики соседних резонансов будут перекрываться. Это и обеспечит расширение рабочего диапазона интерференционных покрытий. Здесь возникает вопрос: как в принципе могут располагаться резонансные частоты диэлектрических слоёв? Решение этой задачи позволит ответить и на другой важный вопрос: как могут располагаться частотные зоны поглощения (а следовательно и отражения) и какова их ширина.

В предлагаемой статье даётся решение сформулированной выше задачи для простейшего интерференционного покрытия, состоящего из нерегулярного диэлектрического слоя, в начале которого расположена резистивная плёнка, а в конце помещён электрический экран, имитирующий металлическую поверхность телекоммуникационной аппаратуры. Предполагается, что диэлектрическая и магнитная проницаемости могут меняться по толщине покрытия и волна падает на покрытие под углом девяносто градусов (нормальное падение).

Поскольку диэлектрический слой с электрическим экраном является распределённой цепью, то его поверхностный импеданс является мероморфной функцией относительно комплексной частотной переменной p [2,4]:

$$Z = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_k p}{p^2 + \omega_k^2} \tag{1}$$

Где β_k – числа; ω_k – полюсы поверхностного сопротивления положительные.

Рассмотрим цепь, состоящую из n (чётное число) линий с постоянным волновым сопротивлением (стержневую цепь Ричардса), замкнутую на конце. Потребуем, чтобы первые n/2 полюсов сопротивления этой цепи были равны ω_k, $\kappa = 1, 2, ..., n/2$. Тогда входное сопротивление цепи Ричардса

$$Z_n(\lambda) = \sum_{k=1}^{n/2} \frac{\alpha_k \lambda}{\lambda^2 + \zeta^2}, \alpha_k > 0, \tag{2}$$

$$\lambda = \text{th}\, p\frac{t_3}{n}, \zeta_k = \text{tg}\, \omega_k \frac{t_3}{n}, t_3 < \frac{n\pi}{2\omega_{n/2}}. \tag{3}$$

Из последних соотношений следует, что $\zeta_k > \zeta_{k-1}$.

Теперь найдём выражение для α_k, при котором Res Z = res $Z_n(\lambda)$, $p = I\,-\omega_k$, $k \leq n/2$. Для этого обозначим $Z_n(\lambda) = \dfrac{A_n(\lambda)}{B_n(\lambda)}$, тогда

$$\alpha_k = 2\frac{A_n(\lambda_k)}{\frac{dB_n(\lambda)}{d\lambda}}, \lambda = \lambda_k = \text{i}\,\zeta, \text{ учитывая, что } \frac{d\lambda}{dp} = \frac{t_3}{n}\frac{1}{ch^2\frac{t_3}{n}}, \frac{dB_n}{dp} = \frac{dB_n}{d\lambda}\frac{d\lambda}{dp},$$

находим $\dfrac{dB_n}{d\lambda} = \dfrac{n}{t_3} ch^2 p \dfrac{t_3}{n}\dfrac{dB_n}{dp}$. Следовательно $\alpha_k = \dfrac{t_3}{n}\dfrac{1}{ch^2 p_k \frac{t_3}{n}}\beta_k$,

где $\beta_k = 2resZ = 2res Z_n(\lambda)$, $p = i\omega_k$.

Учитывая, что рассматриваемые полюсы $Z_n(\lambda)$ в p–плоскости удовлетворяют уравнению $tg\omega\dfrac{t_3}{n} = \zeta_k$, $k = 1,2,...,n/2$, находим время задержки

$$t_3 = \frac{n}{\omega_{n/2}} arctg\, \zeta_{n/2}. \tag{4}$$

Перейдём выражениях (2) и (4) к пределу при $n \to \infty$. В результате выражение (2) перейдёт в (1), а время задержки

$$t_3 = \lim \frac{n}{\omega_{n/2}} arctg \zeta_{n/2}.\quad n \to \infty$$

Поскольку последовательность $\{\zeta_k\}$ имеет предел, то

$$t_3 = \lim arctg\zeta_{n/2} \cdot \lim \frac{n}{\omega_{n/2}}. \quad n \to \infty \tag{6}$$

Следовательно

$$0 < \lim arctg\zeta_{n/2} \leq \frac{\pi}{2}, n \to \infty$$

откуда следует, что

$$0 < t_3 \leq \pi \lim \frac{k}{\omega_k} \quad k \to \infty \tag{7}$$

Таким образом для диэлектрического слоя с конечной толщиной распределение резонансных частот в ограниченной области частот может быть любым. Чтобы поверхностному импедансу (1) соответствовал диэлектрический слой конечной толщины необходимо и достаточно, как видно из выражения (7), выполнить асимптотическое условие: величина предела, стоящего в правой части формулы (7) должна быть конечной величиной, то есть резонансные частоты должны подчиняться условию:

$$0 < \lim \frac{k}{\omega_k} < \infty, k \to \infty \tag{8}$$

Из выражения (7) вытекает, что если величина предела

$$\lim \frac{k}{\omega_k} = 0, \infty, k \to \infty \tag{9}$$

то время задержки (толщина диэлектрического слоя покрытия[3,5]) равно соответственно нулю и бесконечности.Условие (8) является слишком общим и гарантирует существование слоя конечной толщины. Чтобы в конце слоя был помещён электрический экран на резонансные частоты необходимо наложить дополнительные ограничения. Для этого поверхностное сопротивление (1) при конечном верхнем пределе n разложим в непрерывную дробь:

$$Z_n = \cfrac{1}{i\omega C_1 + \cfrac{1}{i\omega L_2 + \cfrac{1}{i\omega C_3 + \cfrac{1}{i\omega L_4 + \ldots + \cfrac{1}{i\omega L_{2n}}}}}} \tag{10}$$

Из данного выражения можно получить формулу для последнего элемента лестничной схемы L_{2n}:

$$L_{2n} = \frac{1}{4\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{\beta_k Q'_{2n}(\omega_k)^2}} \quad Q_{2n} = \prod_{k=1}^{n}\left(1 - \omega^2/\omega_k^2\right) \tag{11}$$

При $n \to \infty$ выражение (10) перейдёт в (1), а индуктивность L_{2n} – в индуктивность последнего элемента слоя. Так как в конце слоя должен находиться электрический экран (обшивка самолёта или ракеты), то индуктивность при $n \to \infty$ должна стремиться к нулю, то есть ряд (β_k ограниченные положительные числа [3])

$$\sum_{k=1}^{\infty} 1 \Big/ Q'(\omega_k)^2 \tag{12}$$

должен расходиться. Выражение для Q(ω) определяется соответствующей формулой (11) при $n \to \infty$.

Таким образом для того чтобы существовал диэлектрический слой с электрическим экраном его резонансные частоты $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < ....$ должны удовлетворять двум условиям: должно быть соблюдено неравенство (8) и ряд (12) должен расходиться. Точно такие же ограничения накладываются и на частотные области поглощения радиомаскировочных покрытий. При этом резонансные частоты являются центральными частотами областей поглощения.Следуя изложенной выше логики можно сформулировать дополнительные ограничения, накладываемые на импеданс диэлектрических покрытий.Чтобы нерегулярный диэлектрический слой с конечным временем задержки не содержал сосредоточенных диэлектрических включений, необходимо и достаточно, чтобы

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_k}{\omega_k^2} < \infty, \tag{13}$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_k \omega_k^2 \left[Q'(\omega_k)\right]^2} < \infty \quad Q(\omega) = \prod_{k=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_k^2}\right). \tag{14}$$

При этом к границе слоя может быть подключено сосредоточенное диэлектрическое включение.

Из данного результата следует ряд следствий.

Следствие 1. Еесли существует предел $\lim\limits_{k \to \infty} \beta_k(\tau)$, то волновое сопротивление слоя

$$Z_в(\tau) = \frac{t_3 - \tau}{2} \lim_{k \to \infty} \beta_k(\tau), 0 \le \tau < t_3. \tag{15}$$

В частности, данное следствие справедливо для плавно нерегулярных слоёв.

Следствие 2. Если диэлектрический слой не содержит сосредоточенных включений при $0 \le \tau < t_3$, то при больших k

$$\frac{1}{k^{1+\delta}} \le \beta_k(\tau) \le k^{1+\delta}, \ \delta > 0. \tag{16}$$

Следствие 3. Если исключить требование (13), то слой может содержать сосредоточенные последовательные индуктивные диэлектрические включения.

 ISSN 1560-8956

Если исключить требование (14), то слой может содержать параллельные ёмкостные включения.В приложениях часто высокоомные и низкоомные отрезки слоёв, имеющих малое время задержки в заданном диапазоне частот, приближенно заменяют сосредоточенными элементами L и C. При выполнении условий (13, 14) данная процедура оказывается справедливой и для слоёв, волновое сопротивления которых обращается в бесконечность или в нуль при некоторых τ. При этом:

$$L = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Z_в(\tau)d\tau, C = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Z_в(\tau)^{-1}d\tau, \tag{17}$$

где $[\tau_1, \tau_2]$, $\tau_1 < \tau_2$, – участок линии внутри, которого $Zв(\tau)$ обращается в бесконечность или в нуль. Величина $\tau_1 - \tau_2$ должна быть достаточно малой.

Приведенные выше рассуждения в полной мере распространяться и на проводимость.

Следствие 4. Чтобы существовал диэлектрический слой с входным сопротивлением

$$z = \frac{\beta_0}{p} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_k p}{\rho^2 + \omega_k^2}, \tag{18}$$

не содержащая сосредоточенных элементов, с волновым сопротивлением $0 < Z_в(0) < \infty$ и набором резонансных частот $0 < \omega_1 < \omega_2 < \ldots$ (спектром $\{\omega_k\}$), нагруженная на лестничную цепь $C_{н1}$, $L_{н2}$, …, состоящую из m элементов, необходимо и достаточно выполнить требование (12) и условия

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\omega_k^{2(m-1)}}{\left[M'(\omega_k)\right]^2} < \infty, \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\omega_k^{2m}}{[M'(\omega_k)]^2} = \infty, M(\omega) = \omega Q(\omega). \tag{19}$$

При этом слой имеет конечное время задержки $0 < t_3 < \infty$. Если рассматривать покрытие, для которого нуль не является резонансной частотой ($\beta_0 = 0$), то в условиях (19) надо $M(\omega)$ заменить на $Q(\omega)$ и под цепью нагрузки понимать лестничную цепь , начинающуюся с последовательной индуктивности.

Следствие 5. Если из последовательности $0 < \omega_1 < \omega_2 < \ldots$ исключить число $\omega_\eta \neq 0$, то новая последовательность будет спектром слоя, нагруженного на лестничную цепь из $(m - 2)$ элементов. Если окажется, что $(m - 2) \leq 0$, то это означает, что спектр соответствует диэлектрическому покрытию с магнитной стенкой. Такой случай возникает, когда исходная последовательность $0 < \omega_1 < \omega_2 < \ldots$ соответствует слою нагруженного на ёмкость или диэлектрическое включение типа последовательный контур. Данный вывод непосредственно следует из соотношения

$$\frac{1}{C_{н1}} = 4\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_0^2}{\beta_k [M'(\omega_k)]^2} + \beta_0, \frac{1}{C_{н1}L_{н2}} = 4C_{н1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_0^2 \omega_k^2}{\beta_k [M'(\omega_k)]^2}, \tag{20}$$

$$\frac{1}{C_{н1}L_{н2}C_{н3}}=4\beta_0^2\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\omega_k^2 C_{н1}L_{н2}-1}{\beta_k[M'(\omega_k)]^2}. \qquad (21)$$

Если к исходной последовательности $0<\omega_1<\omega_2<\ldots$ добавить новое число $\omega_\eta \neq \omega_k$, то новая последовательность будет спектром слоя, нагруженного на цепь с $(m+2)$ элементами.

Если из набора частот $0<\omega_1<\omega_2<\ldots$ исключить произвольные N чисел, отличных от нуля, и добавить другие N чисел, отличных от нуля, то вновь образованная последовательность будет спектром слоя с нагрузкой того же типа и с прежним количеством элементов.

При рассмотрении диэлектрических слоёв, для которых нуль не является резонансной частотой все выводы остаются справедливыми. Если из спектра $0<\omega_1<\omega_2<\ldots$ исключить число нуль, то последовательность $\omega_1<\omega_2<\ldots$ является спектром слоя, нагруженного на лестничную цепь $L_{н1}$, $C_{н2}$, $L_{н3}$, …, состоящей из $(m-1)$ элементов. Если количество элементов получается отрицательным числом или равным нулю, то это означает, что слой имеет магнитную или электрическую стенку. Из сказанного следует, если числа $0<\omega_1<\omega_2<\ldots$ являются спектром слоя с магнитной стенкой, то последовательность $\omega_1<\omega_2<\ldots$ является спектром слоя с электрической стенкой, но не наоборот.

Пример. Пусть

$$\omega_0=0,\ \omega_k=\frac{(2k-1)}{2t_3},\ k=1,2,\ldots,$$

То есть данные числа являются резонансними частотами короткозамкнутой однородной линии с временем задержки t_3, к которым добавлено ещё одно число нуль. Чтобы определить тип нагрузки линии с данным спектром, находим

$$M(\omega)=\omega\prod_{k=1}^{\infty}\left(1-\frac{\omega^2 4t_з^2}{(2л-1)^2\pi^2}\right)=\omega\cos\omega t_з. \qquad (23)$$

Следовательно,

$$M'(\omega)=\cos\omega t_з-\omega t_з\sin\omega t_з. \qquad (24)$$

При $\omega=\omega_k$ $\quad \left[M'(\omega_k)\right]^2=\frac{\pi^2}{4}(2k-1)^2.$

Проверим выполнение условий (2.9). Пусть $m=1$. Тогда

$$\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\left[M'(\omega_k)\right]^2}=\frac{4}{\pi^2}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}=\frac{1}{2},\ \sum_{k=1}^{\infty}\frac{\omega_k^2}{\left[M'(\omega_k)\right]^2}=\infty. \qquad (26)$$

Таким образом, числа ω_k образуют спектр диэлектрического покрытия с ёмкостной нагрузкой. Если к данной последовательности добавить ещё одно число, отличное от имеющихся, то новый числовой набор будет спектром слоя, нагруженного на лестничную цепь $C_{н1}$, $L_{н2}$, $C_{н3}$.

 ISSN 1560-8956

Выводы.

В статье Теоретически обоснована возможность моделирования процесса эффективной радиолокации летательных аппаратов с искусственно сниженной ЕПР и новое решение научной проблемы, суть которой заключается в разработке нового принципа получения и использования радиолокационной информации о воздушной цели с искусственно пониженной эффективной площадью отражения на основе резонансной частотно - фазовой взаимосвязи СВЧ электромагнитного поля с кристаллической структурой радиопоглощающего покрытия.

Список використаних джерел

1. В. В. Цветков, В. П. Демин, А. И. Куприянов. Радиоэлектронная борьба. Радиомаскировка и помехозащита. Вузовская книга - 2012.-240 с.

2. Коваль Ю.О., Милютченко І.О., Олейніков А.М., Шокало, В.М., Браїловський В.В., Бзовий Е.Г., Александров В.В. Основи теорії кіл, сигналів та процесів в системах технічного захисту інформації. НТМТ. - Харків.- 2011.- 544 с.

3.Гиллемин Е.А. Синтез пассивных цепей.-М.: Связь,1970.-720с.

4. Пархомей І.Р. Щодо можливості використання концентрованого резонансного електромагнітного поля. /І.Р. Пархомей//Зб. наук. пр. «Труди академії»., -: К. НАОУ, 2005р.-№61, с.102-108.

5. Пархомей І.Р. Методи підвищення ефективності локації цілей зі штучно зниженою ефективною площею віддзеркалення. /І.Р. Пархомей// Зб. наук.пр. «Труди академії»., –: К. НАОУ, 2005р.-№66, с.83-92.