ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПРОСВЕТЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С БОЛЬШИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЗАТУХАНИЯ НА СВЧ [*]

К. М. Басков, В. Н. Кисель
Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН

Получена 28 декабря 2012 г.

Аннотация. Работа посвящена исследованию возможностей передачи электромагнитной энергии через толстые диэлектрические экраны (толщина экрана несколько скин-слоев) из материалов с высоким коэффициентом затухания на СВЧ. Рассматриваются случаи, когда экран выполнен из обычных диэлектриков с малым тангенсом угла диэлектрических потерь, из металлоподобных материалов с тангенсом угла диэлектрических потерь близким к 90^0 и из плазмоподобных материалов с тангенсом угла диэлектрических потерь больше 90^0. Отдельно рассмотрен случай абсолютного просветления плазмоподобного материала без потерь.

Ключевые слова: электромагнитная волна, дифракционные решетки, эквивалентная линия передачи, слоистый диэлектрик, плазма, электромагнитное просветление.

Abstract. Paper deals with the ability to transmit electromagnetic energy through the thick dielectric screens (screen thickness is several skin depths) of materials with high attenuation at microwave frequencies. The cases where the screen is made of ordinary dielectrics with low loss-angle tangent, with metal-like materials with loss-angle close to 90^0, and of plasma-like materials with loss-angle over 90^0 are considered. The case of absolute translucence of lossless plasma-like material is separately discussed. The results of studies presented in this paper were reported at the 6th All-Russian Conference "Radar and radiocommunication."

Keywords: electromagnetic wave, diffraction gratings, equivalent long line, sandwich dielectric structure, plasma, electromagnetic enlightenment.

[*] Материал докладывался на 6-й Всероссийской конференции "Радиолокация и радиосвязь".

Введение

На практике часто возникают задачи, когда нужно с минимальными потерями передать электромагнитную энергию через поглощающее или отражающее препятствие (экран). Примером таких задач может служить обеспечение качественной радиосвязи между смежными помещениями, передача энергии для питания вживляемых устройств медицинского назначения, съем информации с датчиков, расположенных в герметичных контейнерах и т.д. В работе проводится исследование предельно достижимых возможностей улучшения передачи энергии электромагнитных волн (ЭМВ) через подобные диэлектрические плоскослоистые структуры.

Задача улучшения прозрачности плоскослоистых диэлектрических структур имеет давнюю историю, причем наиболее проработанными следует считать теорию и практику просветления оптических конструкций (см боотражающих диэлектрических слоев проработан достаточно подробно [3, 4], то предельные возможности улучшения передачи энергии сквозь диэлектрические структуры со специфическими свойствами представляют значительный интерес.

Электродинамические свойства изучаемых экранов (большая диэлектрической проницаемость, угол диэлектрических потерь около 90^0) хорошо описываются граничными условиями Леонтовича [12]. Исследования тонких немагнитных поглощающих слоистых материалов показали, что на определенной частоте можно согласовать их входной импеданс с характеристическим сопротивлением окружающей среды с помощью дифракционных решеток (ДР) емкостного типа, которые представляют собой периодические структуры с периодом менее половины длины волны, составленные из металлических элементов, размеры которых также меньше половины длины волны, причем электрические контакты между соседними элементами решетки в направлении поляризации электрического поля падающей волны отсутствуют. Если оптимальное согласование удается достичь, то электромагнитная волна от этой поверхности не отражается. Для электродинамического просветления реального экрана конечной толщины необходимо обеспечить согласование с окружающей средой обеих его поверхностей, чтобы обеспечить полное прохождение энергии ЭМВ через границы раздела сред.

1. Максимальный коэффициент пропускания просветлённых экранов из материалов с высоким затуханием

На рис. 1*а* представлена схема оптимального электродинамического просветления экранов из материалов с высоким коэффициентом затухания. Для целей согласования по обе стороны просветляемого экрана размещаются слои диэлектрика, играющие роль развязки, и ДР емкостного типа. Естественно, для наилучшей передачи энергии ЭМВ необходимо, чтобы диэлектрик и ДР обладали минимальными потерями. В статье рассматривается случай, когда толщина просветляемого экрана составляет несколько скин-слоев, поэтому эквивалентный входной импеданс на его границах не зависит от толщины экрана.

Можно показать, что оптимальная толщина развязывающих диэлектрических слоев не зависит от диэлектрической проницаемости ε_1 и может быть вычислена по формуле:

$$t'_{опт} = t_{опт}(r'_{экв}) - \mathrm{Im}\left(\frac{c}{\omega\sqrt{\varepsilon_2}}\right) \qquad (1)$$

где $t_{опт} = \frac{c}{\omega}\sqrt{\frac{r'_{экв}}{120\pi}}$; $r'_{экв} \approx \mathrm{Re}\left(\frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_2}}\right)$; c – скорость света; ω - круговая частота ЭМВ.

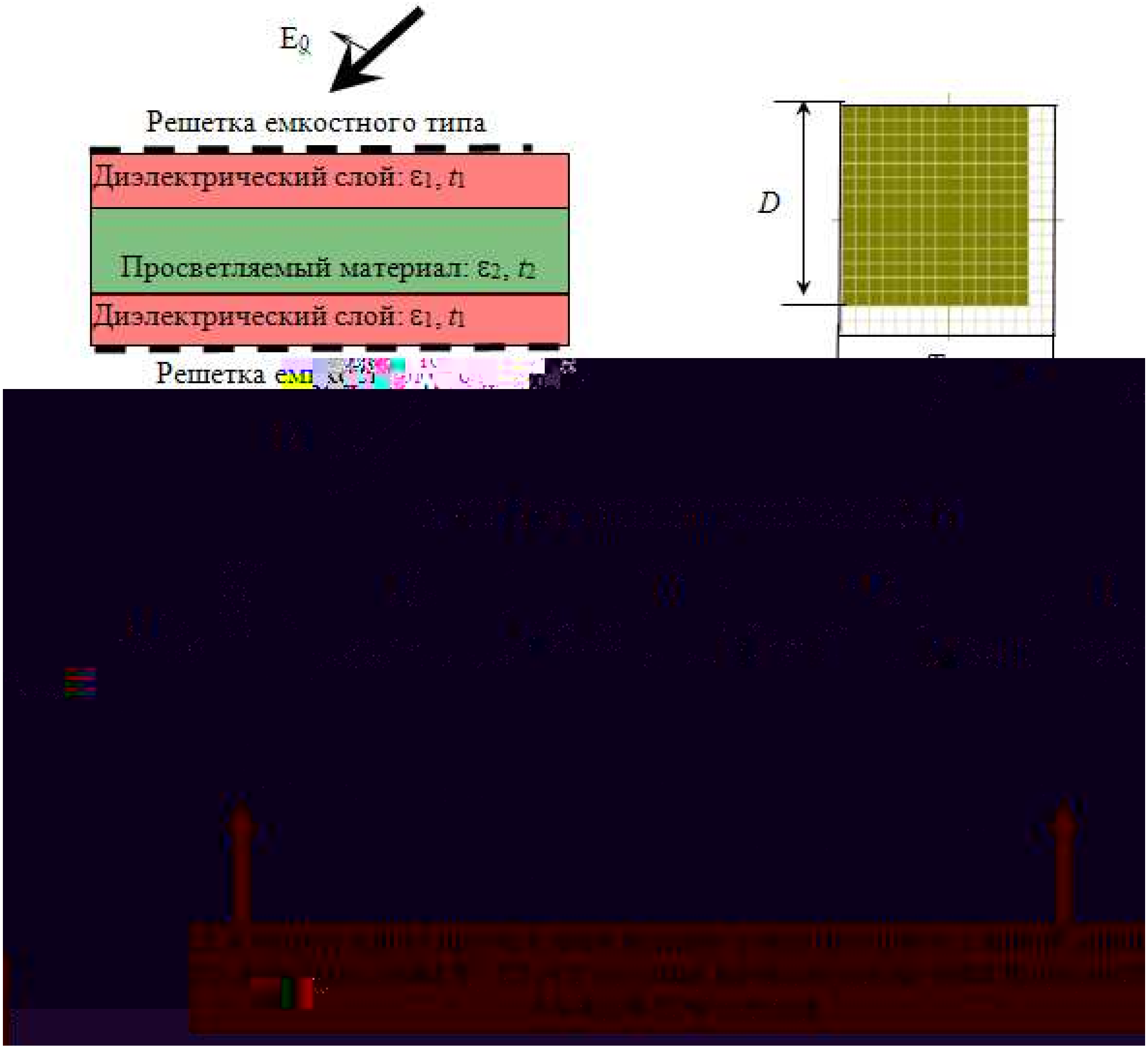


Рис. 1. Оптимальное просветление экранов из материалов с большим коэффициентом затухания ЭМВ

Выбором подходящего значения толщины развязывающих слоёв $t'_{опт}$ можно обеспечить согласование значений импеданса свободного пространства и эквивалентного импеданса каждой из сторон просветляемой структуры (рис. 1*а*). На рис. 1*б* представлена эквивалентная длинная линия такого способа оптимального просветления [13].

На схеме падающая ЭМВ представлена источником напряжения с амплитудой 2 U_0 и внутренним сопротивлением $W_0 = 120\ \pi$. ДР в этой схеме представляется некоторой согласующей емкостью C_C, значение которой можно рассчитать, найдя токи на металлических элементах решетки путем решения задачи рассеяния ЭМВ на многослойной бесконечной периодической решетке, находящейся между слоями слоистого магнитодиэлектрика. В данной работе такая задача была решена численно, с помощью метода интегральных уравнений (ИУ).

Запишем эквивалентное комплексное сопротивление емкости C_C на частоте ω

$$X_C = \frac{1}{j\omega C_C}. \tag{2}$$

Входное сопротивление в эквивалентной схеме $Z_{вх}$. При оптимальном согласовании поверхности $Z_{вх} = W_0$, что требует выполнения следующих двух условий:

$$X_C = -\operatorname{Im} Z_1 \qquad \text{и} \qquad \frac{1}{\operatorname{Re}\frac{1}{Z_1}} = W_0 \tag{3}$$

где Z_1 – входное сопротивление в эквивалентной длинной линии в точке $\boldsymbol{U_1}$

Выходное сопротивление эквивалентной длинной линии Z_C представляет собой параллельное включение сопротивления свободного пространства и сопротивления согласующей емкости:

$$Z_C = \frac{W_0 X_C}{W_0 + X_C} \tag{4}$$

Развязывающий слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε_1 и толщиной t_1 представлен в виде линии задержки с матрицей передачи A_1. Материал с высоким уровнем затухания ЭМВ с диэлектрической проницаемостью ε_2 и толщиной t_2 представлен в виде линии задержки с матрицей передачи A_2. Толщина слоя этого материала составляет, по крайней мере, несколько скин-слоев, поэтому эквивалентное входное сопротивление каждой из его поверхностей равно характеристическому сопротивлению:

$$Z_2 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_2}} \tag{5}$$

Из условий оптимального согласования (3) требуется, чтобы входное сопротивление всей структуры было равно W_0. Можно показать, что для этого импеданс на поверхности развязывающего диэлектрика Z_1 в области ДР (точки $\boldsymbol{U}_1$ и $\boldsymbol{U}_4$ в схеме рис. 1*б*) должен быть равен комплексно-сопряженному сопротивлению Z_C:

$$Z_1 = Z_C^* = \frac{Z_2 a_1 + b_1}{Z_2 c_1 + d_1} \approx Z_2 + jW_1 tg(\gamma_1 t_1), \tag{6}$$

где $W_1 = \dfrac{W_0}{\sqrt{\varepsilon_1}}$; $\gamma_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_1}$

Входное сопротивление развязывающего диэлектрика на поверхности просветляемого экрана (точки $\boldsymbol{U}_2$ и $\boldsymbol{U}_3$ на схеме рис. 1*б*) из условий согласования должно быть равно комплексно-сопряженному сопротивлению Z_2:

$$Z_1' = Z_2^* = \frac{Z_C a_1 + b_1}{Z_C c_1 + d_1} = \frac{Z_C d_1 + b_1}{Z_C c_1 + a_1} \approx Z_C + jW_1 tg(\gamma_1 t_1) \tag{7}$$

Отметим, что условие (7) соответствует тому, что при малых значениях импеданса просветляемого экрана линия задержки, связанная с развязывающим диэлектриком без потерь, эквивалентна последовательному подключению некоторой индуктивности.

Согласно теории длинных линий, для нахождения коэффициента прохождения (КП) в рассматриваемой схеме рис. 1*б* надо найти напряжение $\boldsymbol{U}_4$:

$$U_4 = \frac{2U_0 Z_{вх}}{(Z_{вх}+W_0)}\frac{Z_2}{a_1 Z_2 + b_1}\frac{Z_1'}{a_2 Z_1' + b_2}\frac{Z_C}{a_1 Z_C + b_1} = U_0 \frac{Z_2}{a_1 Z_2 + b_1}\frac{Z_2^*}{a_2 Z_2^* + b_2}\frac{Z_C}{a_1 Z_C + b_1} \quad (8)$$

Тогда при оптимальном просветлении КП будет равен:

$$T = \frac{U_4}{U_0} \quad \to \quad T_{опт} = \frac{Z_2}{a_1 Z_2 + b_1}\frac{Z_2^*}{a_2 Z_2^* + b_2}\frac{Z_C}{a_1 Z_C + b_1} \quad (9)$$

С учетом (6) и (7), а также с учетом того, что просветляемый экран обладает большим затуханием ($\mathrm{Re}(\gamma_2 t_2)$ >> 1), а развязывающий материал потерь не имеет ($\mathrm{Im}(\gamma_1) = 0$), можно записать:

$$T_{опт} = \frac{2Z_2^*}{(Z_2^* + Z_2)\exp(\gamma_2 t_2)}\frac{Z_2 Z_C}{Z_2^* Z_C^*}(c_1 Z_C + d_1)(c_1 Z_2 + d_1) \approx \exp(-\gamma_2 t_2)\frac{Z_2^*}{\mathrm{Re}(Z_2)}\left(\frac{Z_2 Z_C}{Z_2^* Z_C^*}\cos^2 \gamma_1 t_1\right) \quad (10)$$

где $a_2 = ch(\gamma_2 t_2) = \dfrac{\exp(\gamma_2 t_2)}{2}$; $b_2 = Z_2 sh(\gamma_2 t_2) = Z_2 \dfrac{\exp(\gamma_2 t_2)}{2}$;

$d_1 = ch(j\gamma_1 t_1) = \cos\gamma_1 t_1$; $|Z_2| << W_1 \Rightarrow c_1 Z_2 \to 0$; $|Z_C| << W_1 \Rightarrow c_1 Z_C \to 0$;

$Z_1' = Z_2^* = \dfrac{Z_C a_1 + b_1}{Z_C c_1 + d_1}$; $\dfrac{Z_2 Z_C}{Z_2^* Z_C^*}\cos^2 \gamma_1 t_1 \approx 1$.

Первый множитель правой части (10) определяет затухания в материале экрана без учета его границ. Третий множитель по модулю приблизительно равен единице. Это вытекает из (6) и (7). Так как при оптимальном согласовании $|Z_C^*|$ и $|Z_2| << W_1$, то значение $\tan\gamma_1 t_1$ должно быть малой величиной, а значит $\cos\gamma_1 t_1 \approx 1$. Уравнение (5) можно записать в виде:

$$Z_2 = \frac{W_0}{\sqrt{|\varepsilon_2|}}\left(\cos\frac{\delta}{2} - j\sin\frac{\delta}{2}\right), \quad (11)$$

где δ – угол диэлектрических потерь, т.е. $\delta = \mathrm{arctg}\dfrac{\mathrm{Im}\,\varepsilon_2}{\mathrm{Re}\,\varepsilon_2}$.

Второй множитель в (10) можно записать в виде

$$\frac{Z_2}{\mathrm{Re}(Z_2)} = \frac{1}{\cos\frac{\delta}{2}} > 1 \tag{12}$$

В итоге модуль оптимального КП (т.е. КП, полученного при оптимальном согласовании) равен произведению модулей первого множителя $|T'|$, который определяет затухание в материале экрана без учета его границ, и второго множителя $|T_{\max}|$, который определяется условиями входа в материал и выхода из него энергии ЭМВ:

$$|T_{опт}| = |T'||T_{\max}|, \tag{13}$$

где $|T_{\max}| = \frac{Z_2^*}{\mathrm{Re}(Z_2)} = \frac{1}{\cos\frac{\delta}{2}}$; $T' = \exp(-\gamma_2 t_2)$

Значение оптимального КП при толщине просветляемого экрана в n скин-слоев можно выразить в дБ:

$$T_{опт} = -8{,}87n + 20\log_{10}\left(\frac{1}{\cos\frac{\delta}{2}}\right) \tag{14}$$

Из выражения (13) следует, что оптимальный КП не может превышать определенного уровня, а максимальное превышение КП просветляемого экрана над затуханием в материале зависит от его угла диэлектрических потерь. Можно выделить несколько категорий материалов с различной эффективностью возможного просветления:

1) *Обычные диэлектрики с небольшими потерями (*$\tan\delta << 1$*).* При полном согласовании с сопротивлением окружающего пространства внешних поверхностей экранов из таких материалов КП будет определяться количеством скин-слоев. Увеличение КП в таких экранах возможно только за счет снижения коэффициента отражения.

2) *Металлоподобные материалы ($\delta \approx 90^0$).* При полном согласовании с сопротивлением окружающего пространства внешних поверхностей экранов таких материалов КП будет на 3 дБ выше, чем исходное затухание в них.

3) *Плазмоподобные материалы ($\delta > 90^0$).* При полном согласовании с сопротивлением окружающего пространства внешних поверхностей экранов их таких материалов КП будет существенно выше, чем затухание в них.

2. Оптимальное просветление экранов из плазмоподобных материалов

Поверхностный импеданс плазмоподобных материалов имеет индуктивный характер, поэтому входное сопротивление Z_2 удобно представить в виде параллельного соединения некоторой индуктивности и активного сопротивления:

$$R_2 = \frac{W_0}{\sqrt{|\varepsilon_2|}\cos\frac{\delta}{2}} \qquad j\omega L_2 = j\frac{W_0}{\sqrt{|\varepsilon_2|}\sin\frac{\delta}{2}} \tag{15}$$

Чтобы появилась возможность выполнения 2-го условия из (13), требуется выполнение неравенства:

$$\sqrt{|\varepsilon_2|}\sin\frac{\delta}{2} \ge 1 \tag{16}$$

Если (16) не выполняется, то максимальное повышение КП экрана за счет просветления по рассматриваемой схеме будет в том случае, если согласующие ДР находятся непосредственно на поверхности просветляемого экрана, а их конструкция обеспечивает выполнение 1-го условия оптимального просветления (3) (рис. 2).

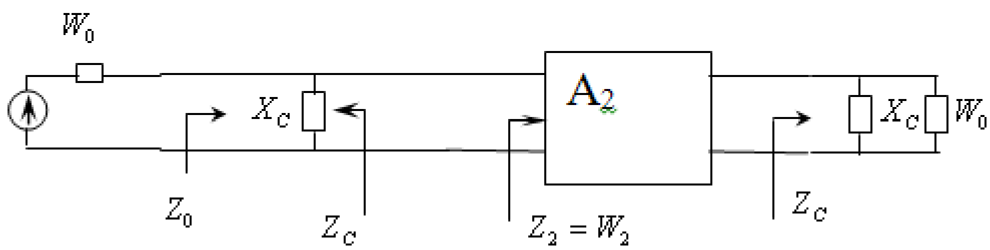


Рис. 2. Схема просветления экранов из плазмоподобных материалов с малыми потерями.

Аналогичным образом можно вывести максимальное превышение КП над затуханием в плазмоподобном материале, когда неравенство (16) не выполняется:

$$|T_{\max}| = \left| \frac{4Z_0}{Z_0 + W_0} \frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{|\varepsilon_2|}\cos\frac{\delta}{2} + 1} \right| \tag{17}$$

В предельном случае, когда в плазмоподобном материале нет потерь ($\delta = 180^0$),

$$|T_{\max}| = \left|4\sqrt{\varepsilon_2}\right| \tag{18}$$

На рис. 3 представлены графики зависимости превышения КП над затуханием в материале, из которого сделан оптимально просветленный экран, от угла диэлектрических потерь этого материала.

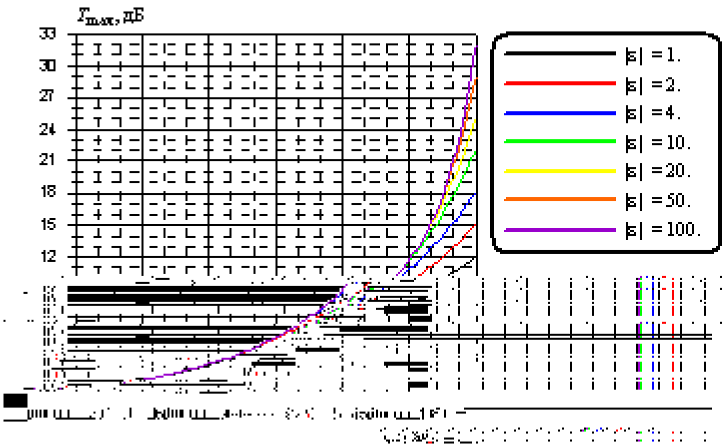


Рис. 3. Зависимость $T_{\max}$ от угла диэлектрических потерь δ.

3. Результаты измерений и численных экспериментов по просветлению экранов из материалов с большим затуханием ЭМВ

Для проверки предложенной схемы был проведен эксперимент по просветлению экрана из металлоподобного материала марки Х-10 с диэлектрической проницаемостью на частоте 2 ГГц ε_2 =300 – j 1400. Структура просветленного экрана представлена на рис. 4*а*. Толщина просветляемого материала была t_2 = 0,41 мм. В качестве развязывающих слоев использовались листы бумаги (ε_1= 2,53 – j0,14). Из формул (1) следует, что оптимальная толщина развязывающих слоев для наилучшего просветления экрана с большой толщиной из материала Х-10 на частоте 2,1 ГГц составляет 2,9 мм. В эксперименте толщина развязывающих слоёв была t_1 =3,0 мм. В качестве согласующих ДР были использованы решетки из металлических полос с периодом Т = 40 мм и шириной полос D = 37,5 мм. Электрическое поле падающей ЭМВ было поляризовано перпендикулярно щелям между полосами (рис. 4*б*). Измерение частотной зависимости диэлектрических проницаемостей используемых материалов и частотной зависимости КП просветленного и непросветленного экранов проводились на панорамном стенде, измеряющим S-параметры, с использованием диафрагмы диаметром 180 мм.

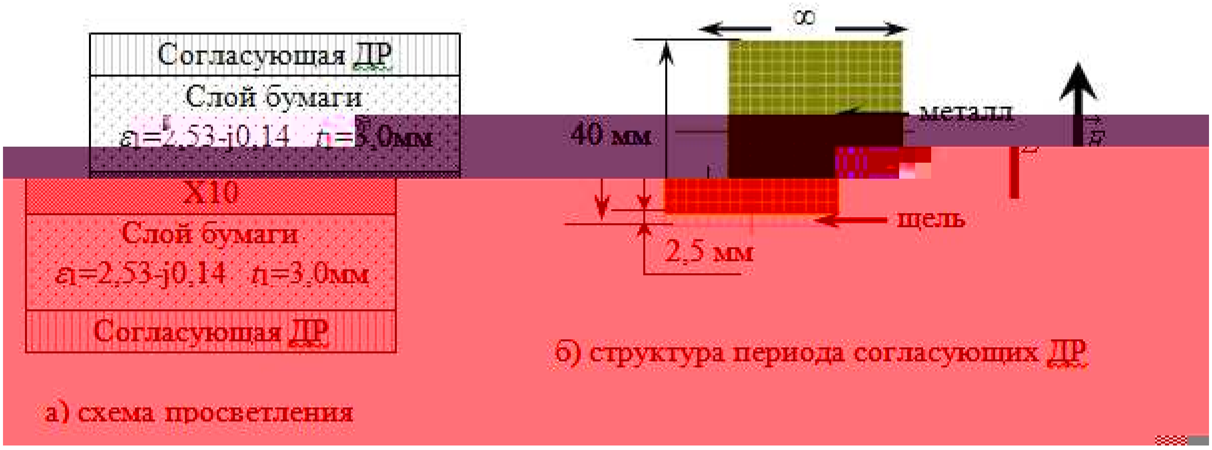


Рис. 4. Просветление экрана из металлоподобного материала Х-10.

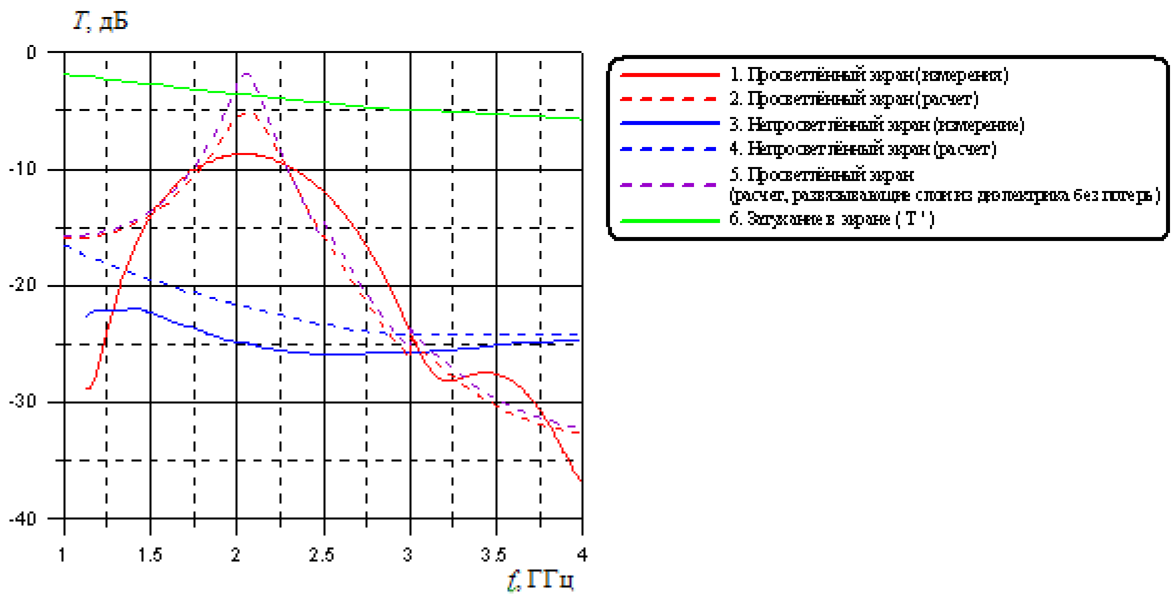
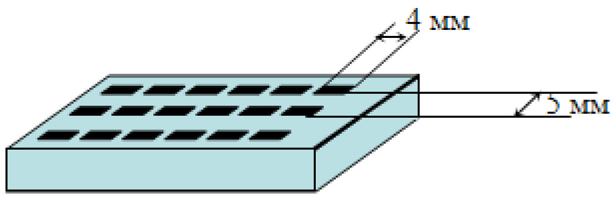


Рис. 5. Частотные зависимости КП экрана на основе металлоподобного материала Х-10.

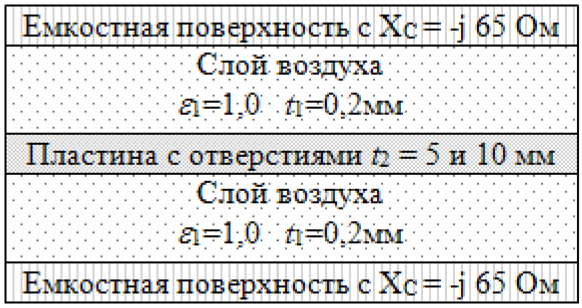
На рис. 5 приведены графики измеренных и вычисленных частотных зависимостей КП материала как с согласующими ДР (кривые 1 и 2), так и без них (кривые 3 и 4). Также на рис. 5 приведена рассчитанная частотная зависимость КП просветленного экрана в случае использования в развязывающих слоях диэлектрика без потерь (кривая 5). Из графиков видно, что при использовании согласующих ДР КП слоя из металлоподобного материала Х-10 на частоте 2,1 ГГц увеличился на 16 дБ (кривые 1 и 3). Расчёты показывают, что при более качественном изготовлении образца можно рассчитывать на получение более высокого уровня КП просветленного экрана, а именно, -5,3 дБ (кривая 2). Также расчеты показывают, что КП такого экрана на частоте 2,1 ГГц при отсутствии потерь в развязывающих слоях диэлектрика составит -1,8 дБ (кривая 5), что на 1,9 дБ больше затухания в материале *T'* (кривая 6). Максимально достижимый КП $T_{опт}$ = -1,5 дБ должен получиться при абсолютно точном подборе параметров согласующих ДР и развязывающих слоёв из диэлектрика без потерь.

Аналогом экрана из плазмоподобного материала с δ=180^0 является толстая металлическая пластина с малыми по сравнению с длиной волны отверстиями, т.е. периодическая решетка из запредельных волноводов. Для экрана в виде толстой металлической пластины с квадратными отверстиями (размер стороны квадрата – 4 мм), расположенными с периодом 5 мм (рис. 6*а*), была составлена схема просветления с помощью согласующей поверхности с реактивным поверхностным сопротивлением X_C = -j 65 Ом (рис. 6*б*). Конструктивно такая поверхность может быть реализована на основе, например, ДР емкостного типа, которая проявляет необходимые свойства, лишь находясь на некотором удалении от металлической поверхности, где касательная компонента электрического поля не равна нулю. Поэтому между пластиной и согласующими поверхностями устанавливался небольшой воздушный зазор. На рис. 7 представлены вычисленные с помощью коммерчески доступных программ электродинамического моделирования частотные зависимости КП исходного и просветленного экранов толщиной 5 и 10 мм (кривые 1 и 3), а также частотные зависимости КП слоя плазмоподобного материала (кривые 2 и 4), параметры которого соответствуют эквивалентным ε_2 и μ_2 экрана на частоте 10 ГГц (ε_2=36, μ_2 =0,48 для пластины толщиной 5 мм и ε_2 =33, μ_2 =0,44 для пластины толщиной 10 мм). Так как у данного плазмоподобного материала магнитная проницаемость μ_2 не равна 1, формула (18) несколько изменяется:

$$|T_{\max}| = \left|4\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}}\right| = 4\sqrt{75} = 30{,}8\ \partial Б \qquad (19)$$

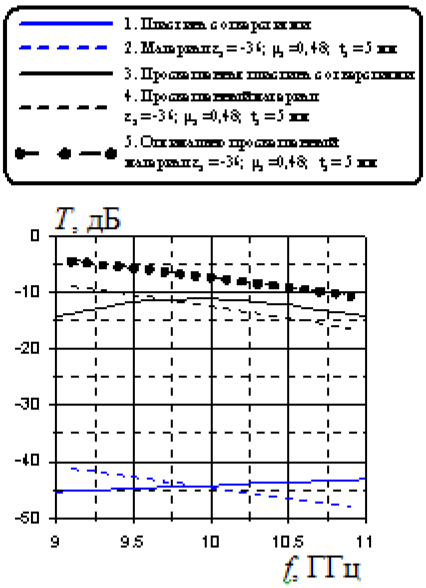


а) аналог плазмоподобного материала металлическая пластина с отверстиями

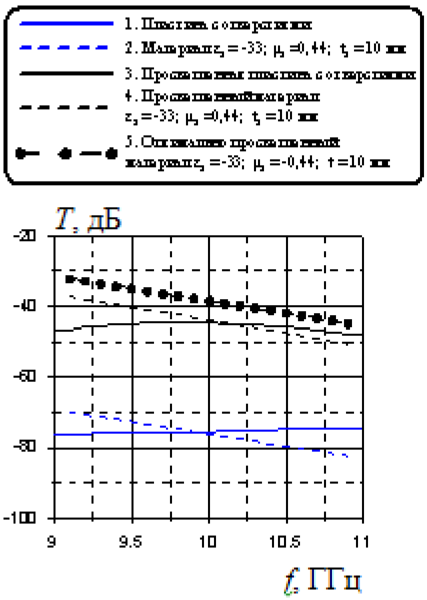


б) схема просветления экрана из плазмоподобного материала

Рис. 6. Просветление экрана из плазмоподобного материала.



а) пластина толщиной 5 мм

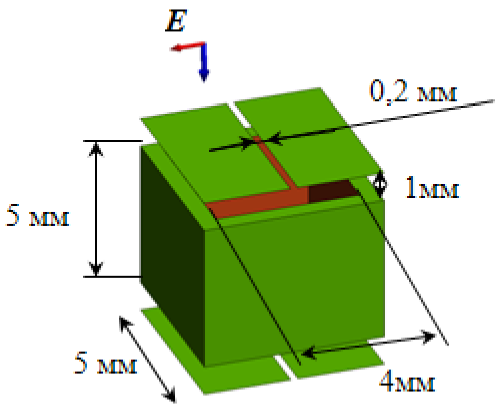


б) пластина толщиной 10 мм

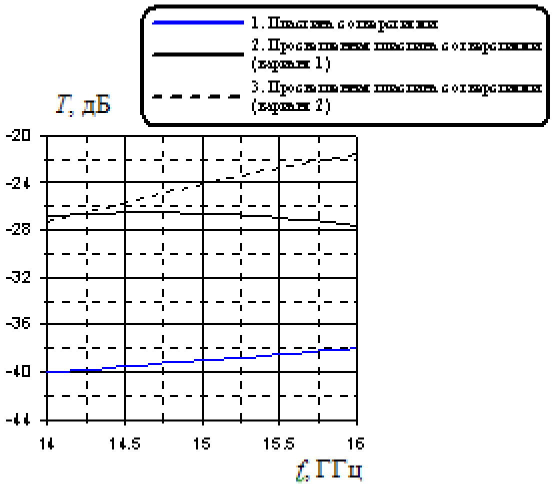
Рис. 7. Частотные зависимости КП экрана из плазмоподобного материала.

Отметим, что схема, представленная на рис. 6*б*, не является оптимальной для просветления, так как согласование поверхностей экрана с сопротивлением окружающего пространства с помощью ДР осуществляется на некотором отдалении от экрана, а не непосредственно на его границах. На рис. 7 приведены дополнительно данные для оптимального просветления слоя из плазмоподобного материала в случае, когда согласующие структуры находятся непосредственно на границах просветляемого экрана (кривая 5). Видно, что если бы используемый плазмоподобный материал допускал размещение ДР на поверхности, улучшение просветления составило бы 3,7 дБ.

В качестве иллюстрации возможностей просветления экранов из плазмоподобных материалов были рассчитаны частотные зависимости КП бесконечной периодической структуры, один период которой показан на рис. 8*а*. В металлической пластине толщиной 5 мм имеются отверстия с формой сечения в виде квадрата со стороной 4 мм, пространственный период расположения отверстий в обоих направлениях составляет 5 мм. На частоте 15 ГГц радиотехнические характеристики такой пластины эквивалентны характеристикам слоя магнитодиэлектрика с ε=14 и μ=0,48. С двух сторон на расстоянии 1 мм от поверхности пластины расположены ДР емкостного типа в виде широких металлических полос, размещенных с тем же периодом перпендикулярно направлению вектора электрического поля, зазор между полосами составляет 0,2 мм. На рис. 8*б* представлены вычисленные частотные зависимости КП пластины с просветляющими ДР и без них (кривые 1 и 2). Видна возможность значительного улучшения прозрачности за счет применения просветляющих ДР. Пунктирной линией на рис. 8*б* представлен график частотной зависимости КП в случае, когда ДР располагались на расстоянии 0,5 мм от поверхностей пластины (кривая 3). Видно, что при уменьшении зазора между экраном и ДР КП увеличивается. Согласно (19), оптимальное значение КП в данном случае составляет $T_{опт} = 12{,}3\ дБ$, но для реализации этого значения необходимо использовать ДР, эквивалентное поверхностное сопротивление которых слабо зависит от наличия экрана рядом с ними.



а) один период периодической структуры



б) Частотная зависимость КП периодической структуры

Рис. 8. Просветление экрана из плазмоподобного материала с помощью ДР емкостного типа.

4. Одностороннее просветление экранов из плазмоподобных материалов с δ=180^0

В случае экрана из плазмоподобного материала без потерь с $\delta=180^0$ [14] вся энергия падающей волны отражается от поверхности без поглощения в слое материала. Эквивалентный импеданс у поверхности такого материала имеет чисто индуктивный характер [15]. Точная формула для вычисления импеданса имеет вид:

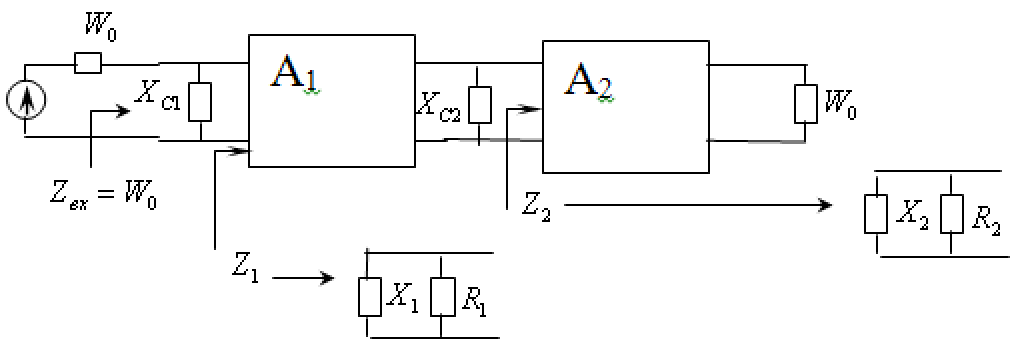
$$Z_2 = \frac{W_0 ch(j\gamma_2 t_2) - W_2 sh(j\gamma_2 t_2)}{\frac{W_0}{W_2} sh(j\gamma_2 t_2) - ch(j\gamma_2 t_2)} \qquad (20)$$

На рис. 9*а* представлена схема одностороннего просветления экрана из плазмоподобного материала без потерь с помощью двух ДР разных типов. Для расчета параметров просветления удобно представить входное сопротивление Z_2, рассчитанное по формуле (20), в виде параллельного соединения индуктивности X_2 и активного сопротивления R_2. Графики зависимости значений этих сопротивлений от толщины экрана на частоте 2,5 ГГц при ε_2 = -100 и -50 приведены на рис. 9*б*. Из графиков видно, что при достижении согласования реактивной части входное сопротивление Z_2 будет активным и равным некоторой большой величине, связанной с сопротивлением окружающего пространства за экраном. Из теории длинных линий известно, что короткая линия задержки (длиной менее четверти длины волны) трансформирует большое активное сопротивление в меньшее сопротивление с реактивной емкостной и активной частями. Из этого следует, что если после компенсации реактивной части сопротивления X_2 с помощью емкостного сопротивления ДР X_{C2} ввести через диэлектрическую прослойку с толщиной менее четверти длины волны согласующую индуктивность X_{C1} в виде ДР индуктивного типа (решетку из проводов, параллельных электрическому полю падающей волны [3,5,16]), то можно добиться полного согласования входного сопротивления $Z_{вх}$ такой структуры с волновым сопротивлением свободного пространства.

Используя эти соображения, были просветлены экраны из материала с ε_2 = -100, толщина которых составила *t*

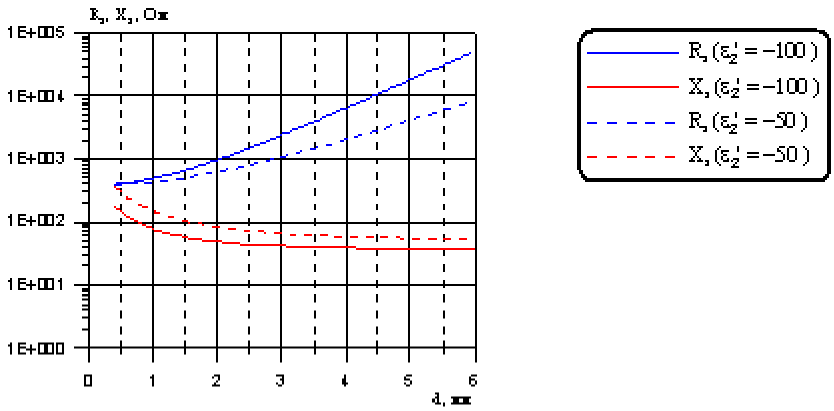
14.04 Tf 5.40305 0 Td [( )1.478633( )7.70019]TJ /R10 14.04 2f 59.9138 0 Td ( )Tj /R14 14.04 Tf 4.56257 0 Td [( )-381643( )-4.55 68546( )3.01694( )-0.84/R10 14.04 Tf 33.8591 0 Td (-)Tj 0.31694( )-0.847667( )3.0695( )3.01747667( )-0.847667( )-1.61443( )12.5458( )760937( )3.9904 Tf 50.4284 0 Td ( )Tj5]

31694( )-0.84к7667( )3.060986( )]TJ /R10 14..32081( )12.586( )500]TJ /R10 1к4.04 Tf 48.8676 0 T



$$X_2 = -X_{C2} \quad X_1 = -X_{C1} \quad R_1 = W_0$$

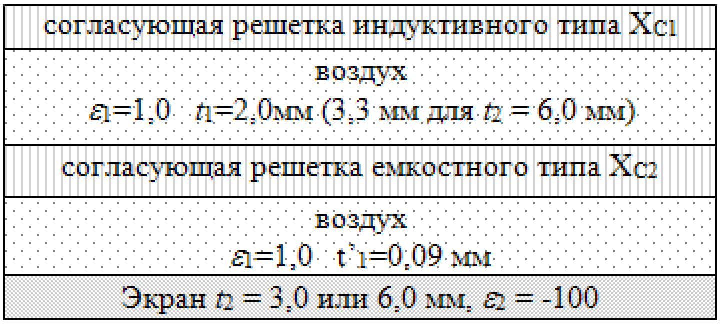
а) схема одностороннего просветления экрана с помощью двух ДР емкостного и индуктивного типов



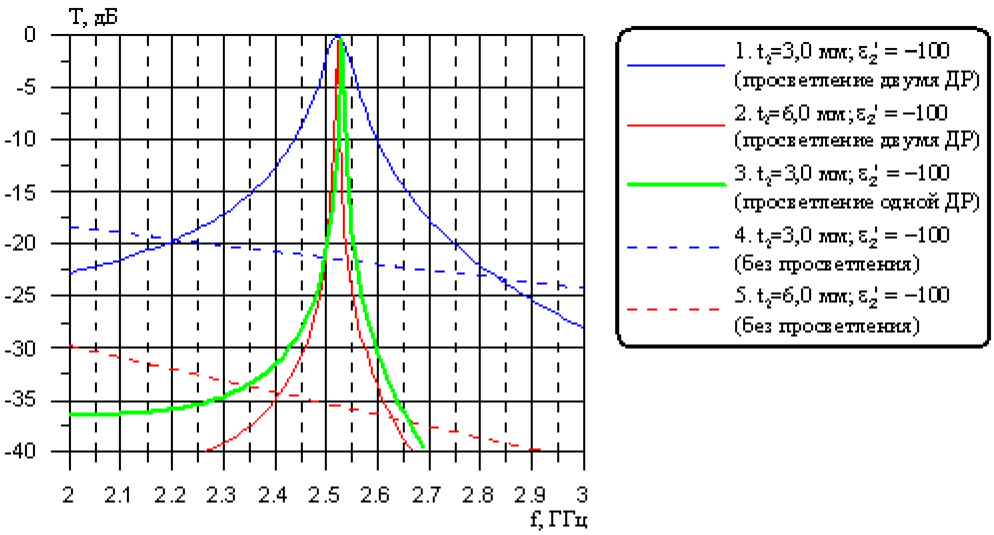
б) зависимость активной R_2 и реактивной X_2 частей поверхностного импеданса просветляемого экрана толщиной $t_2 = 3{,}0$ мм

Рис. 9. Одностороннее просветление экрана с помощью двух ДР емкостного и индуктивного типов.

Можно указать еще один способ идеального одностороннего просветления, который проще в реализации, но является более узкополосным. Суть его в том, что согласующая ДР емкостного типа устанавливается от поверхности экрана через развязывающий слой диэлектрика толщиной равной приблизительно половине длины волны (t_1 = 58 мм) (эквивалентная схема представлена на рис. 11*а*). Если рассмотреть частотную зависимость активной и реактивной частей входного сопротивления при параллельном включении R_1 и X_1 в такой схеме (рис. 11*б*), то можно заметить, что на частоте f = 2,53 ГГц активная часть входного сопротивления равно 120π, а реактивная имеет индуктивный характер с малым по модулю значением сопротивления. При подборе параметров ДР таким образом, чтобы решетка была эквивалентна параллельному включению реактивного сопротивления $-X_1$, можно добиться полного просветления экрана (ДР емкостного типа представляет собой решетку с периодом T= 20 мм из металлических квадратов со стороной D = 18,75 мм, между квадратами установлены сосредоточенные емкости 1,2 пФ).



а) одностороннее просветление экрана из плазмоподобного материала с помощью двух ДР емкостного и индуктивного типов

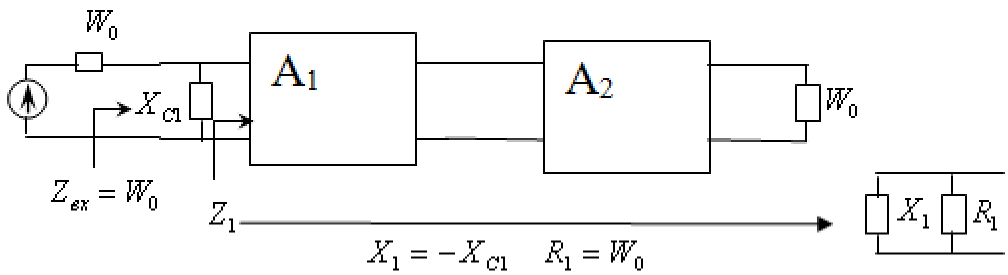


б) расчетные частотные зависимости КП экранов из плазмоподобного материала

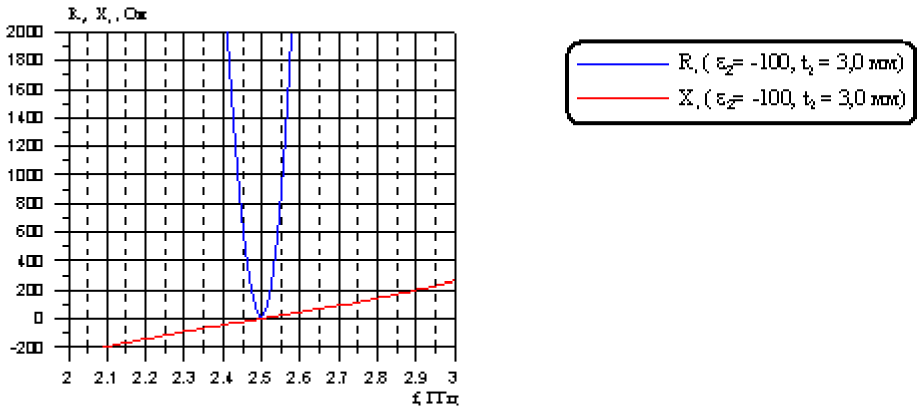
Рис. 10. Просветление экранов толщиной t_2 3,0 мм и 6,0 мм из плазмоподобного материала с ε'_2 =-100 с помощью двух ДР емкостного и индуктивного типов.

Частотная зависимость КП экрана, просветленного вторым способом, показана на рис. 10*б* (кривая 3). На частоте 2,53 ГГц просветленный экран абсолютно прозрачен. Сравнение частотных просветления показывает, что второй вариант является более узкополосным. В то же время он технологичнее, т.к. используется лишь одна просветляющая ДР.

Таким образом, экран любой толщины из плазмоподобного материала без потерь можно сделать абсолютно прозрачным на определенной частоте, при этом просветляющие ДР необязательно должны располагаться одновременно по обе стороны экрана. Полоса просветления с ростом толщины экрана резко сужается. Если использовать двухстороннее просветление экранов из таких материалов, то параметры эффективности (широкополосность просветления, влияние малых потерь в экране и просветляющей структуре на снижение КП) будут выше.



а) схема одностороннего просветления экрана с помощью одной ДР емкостного типа



б) зависимость активной R_1 и реактивной X_1 частей поверхностного импеданса просветляемого экрана (t_2 =3,0 мм ε_2 = -100) на расстоянии t_1 58 мм от его поверхности

Рис. 11. Одностороннее просветление экрана с помощью ДР емкостного типа.

Заключение.

Полученные результаты показывают, что при необходимости улучшить эффективность передачи энергии через среды с большим затуханием ЭМВ можно успешно использовать ДР. КП экранов из обычных диэлектриков с небольшим коэффициентом затухания можно увеличить только за счет снижения отражения от их поверхностей. Экраны из металлоподобных материалов просветляются более эффективно. Увеличение КП в таких экранах возможно не только за счет снижения отражения, но и за счет создания более благоприятных условий прохождения ЭМВ вблизи границ раздела сред. Особенно эффективным является просветление экранов из плазмоподобных материалов. Затухание в таких материалах не связано с поглощением (преобразованием энергии волны в тепло). Предложенные схемы просветления позволяют увеличить КП через экраны из плазмоподобных материалов до значительно большего уровня, чем исходное затухание ЭМВ в них.

Если нет возможности размещать согласующие ДР с двух сторон экрана, то можно использовать одностороннее просветление, когда согласующие решетки устанавливаются только по одну сторону экрана, что менее эффективно, но все же позволяет увеличивать КП. Особенно интересно полное одностороннее просветление экранов из плазмоподобных материалов без потерь. Как было показано, в этом случае сопротивление свободного пространства (полезная нагрузка в эквивалентной схеме), преобразуется в большое входное активное сопротивление, которое шунтируется малым индуктивным сопротивлением. В теории линий передач рассматривается много способов согласования такого рода сопротивлений с источником сигнала. Используя аналогичные подходы, можно составить схемы для полного просветления (на определенной частоте) экранов любой толщины из плазмоподобных материалов без потерь.

Литература

1. И.В. Гребенщиков, А.Г. Власов, Б.С. Непорент и др. Просветление оптики. Под ред. И.В. Гребенщикова. М.: Гостехиздат. 1946.

2. Т.Н. Крылова. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение. 1973.

3. В.А. Каплун. Обтекатели антенн СВЧ. М.: Сов. радио. 1974.

4. Б.А. Пригода, В.С. Кокунько. Обтекатели антенн летательных аппаратов. М. Машиностроение. 1978г.

5. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. И.Г. Гуртовник, В.И. Соколов, Н.Н. Трофимов, С.И. Шалгунов. М.: Мир, 2003.

6. Ч.О. Каджар, Р.М. Касимов, С.Р. Касимова. Просветление тепловых приемников электромагнитного излучения. Прикладная физика, №4, с. 79-82, 2000.

7. В.И. Матвеев. Обнаружение объектов за непрозрачными преградами. Мир и безопасность. №6. 2011.

8. Е.Ф. Харченко, В.А. Анискович, И.С. Гавриков и др. Способ изготовления радиопрозрачного бронеэкрана из полимерных композитов и радиопрозрачный бронеэкран из полимерных композитов. Патент № 2412422.

9. A.M. Sodagar, K.D. Wise, K.Najafi. A wireless implantable microsystem for multichannel neural recording. IEEE Trans. MTT. V. 57. N 10. P. 2565-2573.

10. T.Feng, Y.Li, Y.Sun, L.He, H. Li, Y. Shi, H. Chen. Electromagnetic tunneling in a sandwich structure containing single negative media. Phys. Rev. E. Vol. 79. P. 026601. 2009.

11. J. Choi, C. Seo. High-efficiency wireless energy transmission using magnetic resonance based on metamaterial with relative permittivity equal to -1. Progress in Electromagnetic Research. Vol. 106. 33-47. 2010.

12. Л.А. Вайнштейн “Электромагнитные волны”. Москва, “Радио и связь”. 1988 г.

13. В.В. Бодров, В.И. Сурков “Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн”. Москва, Издательство МЭИ. 1994 г.

14. В.Л. Гинзбург “Распространение радиоволн в плазме”. Москва. Государственное издательство физико-математической литературы. 1961 г.

15. Менде Ф. Ф., Спицын А. И. “Поверхностный импеданс сверхпроводников”. Киев, Наукова думка, 1985.- 240 с.

16. В.О. Кобак “Радиолокационные отражатели”. Москва, “Советское радио”. 1975 г.