

УДК 677.025.6:537.311.4

**ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ
МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТРИКОТАЖА
НА ЕГО РАДИООТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА
ПРИ ОДИНАКОВЫХ РАЗМЕРАХ ЯЧЕЕК
ПО ВЕРТИКАЛИ И ГОРИЗОНТАЛИ**

Л.А. КУДРЯВИН, О.Ф. БЕЛЯЕВ, В.А. ЗАВАРУЕВ

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)

С целью получения радиотражающей поверхности складных антенн широко используются металлические сетки, изготовленные из проволок очень малого диаметра (микропроволок). Если вначале для этого применяли тканые сетки, то из-за ряда существенных недостатков последних (малая эластичность, образование заминов при складывании и раскрытии антенн и т.п.) в настоящее время используются в основном трикотажные металлические сетеполотна.

Для проектирования металлических сетеполотен необходима теоретическая оценка влияния различных факторов, например, таких, как размер ячеек, диаметр проводников, контактное сопротивление между элементами структуры и т.п., на их радиотражающие свойства. Однако по причине сложной петельной структуры многих сетеполотен такая оценка затруднена.

В связи с этим оценку начали осуществлять с наиболее простого вида трикотажа – кулирного трикотажа переплетения гладь (рис.1-а). В [1] было показано, что по радиотражающим свойствам этот трикотаж эквивалентен тканой сетке, схематически изображенной на рис. 1-б.

В эквивалентной тканой сетке сопротивления R_{1x} , R_{1y} одного погонного метра проводников, расположенных вдоль осей X и Y соответственно, рассчитываются по формулам

$$R_{1x} = R_0 + \frac{R_k R_0 b}{(R_k + R_0 b)a},$$

$$R_{1y} = R_0 + \frac{R_k}{b}.$$

Здесь a и b – размеры ячеек вдоль осей X и Y соответственно; R_0 – истинное сопротивление одного погонного метра проводника; R_k – контактное сопротивление между элементами структуры, имеющее место в точках А и В (рис.1-а) и в аналогичных им точках.

Основываясь на вышесказанном, в [1] теоретически получены выражения для коэффициентов отражения электромагнитных волн от кулирного металлического трикотажа переплетения гладь. При этом предполагалось, что электромагнитная волна может падать на поверхность трикотажа под любым углом.

В настоящей работе полученные фор-

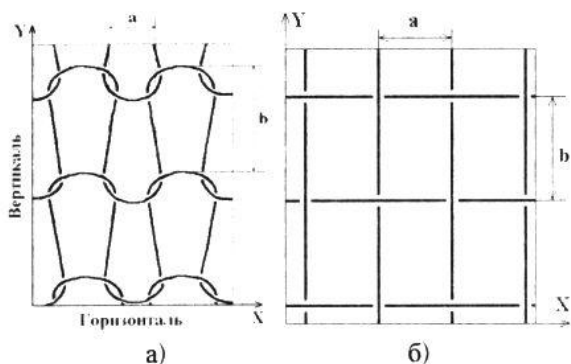


Рис. 1

мулы используются для определения коэффициента отражения R электромагнитных волн от такого трикотажа при падении волны перпендикулярно его поверхности. В этом частном случае формулы, приведенные в [1], значительно упрощаются и выглядят следующим образом:

$$R = \left\{ 1 + i \left(\kappa_1 \sin^2 \varphi + \kappa_2 \cos^2 \varphi \right) \right\} I^{-1},$$

$$I = (1 - \kappa_1 \kappa_2) + i(\kappa_1 + \kappa_2),$$

$$\kappa_1 = \kappa_{10} (1 + F_x), \quad \kappa_2 = \kappa_{20} (1 + F_y),$$

$$\kappa_{10} = \frac{2b}{\lambda} \ln \frac{b}{\pi d}, \quad \kappa_{20} = \frac{2a}{\lambda} \ln \frac{a}{\pi d},$$

$$F_x = \frac{\mu f(p_x)}{4 \ln \frac{b}{\pi d}}, \quad F_y = \frac{\mu f(p_y)}{4 \ln \frac{b}{\pi d}},$$

$$p_x = \frac{d}{4\Delta_x}, \quad p_y = \frac{d}{4\Delta_y},$$

$$\Delta_x = \sqrt{R_{1x} \pi d^2 / (2\omega \mu \mu_0)},$$

$$\Delta_y = \sqrt{R_{1y} \pi d^2 / (2\omega \mu \mu_0)}.$$

Здесь d – диаметр проводника; λ – длина волны падающего электромагнитного

$$f(p) = \begin{cases} (1 - i/p^2) & \text{- при малых } p \text{ (слабый скин-эффект),} \\ (1 - i)/p & \text{- при больших } p \text{ (сильный скин-эффект),} \\ 0 & \text{- при нулевом сопротивлении проводника} \\ & \text{и нулевом контактном сопротивлении.} \end{cases}$$

Коэффициент отражения R , рассчитываемый по приведенной выше формуле, представляет собой отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей. Однако для практических целей более важен квадрат модуля этого коэффициента ($|R|^2$). Он представляет собой отношение интенсивности отраженной волны к интенсивности падающей. Именно его мы будем использовать и называть коэффициентом отражения.

С помощью полученных формул нами проведен расчет зависимости $|R|^2$ для кулирного металлического трикотажного сетеполотна с одинаковыми размерами ячеек

излучения; ω – циклическая частота электромагнитной волны; μ – магнитная проницаемость материала проводника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; i – мнимая единица; Δ – толщина скин-слоя (при высоких частотах ток течет не по всему объему проводника, а только по его поверхностному слою (скин-слою)).

Величина $f(p)$ может быть рассчитана по следующей формуле:

$$f(p) = -(1+i) \left\{ \frac{J_0[2(1-i)p]}{J_1[2(1-i)p]} \right\} / p.$$

В зависимости от направления рассматриваемых проводников под p здесь следует понимать либо p_x , либо p_y , $J_0[2(1-i)p]$ и $J_1[2(1-i)p]$ – функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно.

В предельных случаях сильного ($\Delta \ll d$) и слабого ($\Delta \gg d$) скин-эффекта $f(p)$ принимает следующий вид:

по горизонтали и вертикали от контактного сопротивления между элементами структуры и от размера ячейки. Расчеты проводили для сетеполотна переплетения гладь, изготовленного из стальной микропроволоки разных диаметров. Выбор стальной микропроволоки был обусловлен необходимостью получения заданных физико-механических свойств сетеполотна.

Ниже приводятся результаты расчетов, полученные на сетеполотне, изготовленном из наиболее часто применяемой нами ранее стальной микропроволоки диаметром 50 мкм при длине волны падающего электромагнитного излучения, составляющей 2 см (частота 15 ГГц).

Как показали измерения, электрическое

сопротивление 1 м пог. микропроволоки диаметром 50 мкм составляло 400 Ом, контактное сопротивление между элементами структуры в зависимости от натяжения микропроволоки в сетеполотне менялось в пределах от 15...20 Ом (при натяжениях 0,01...0,02 Н) до 2...3 Ом (при натяжениях 0,15...0,20 Н).

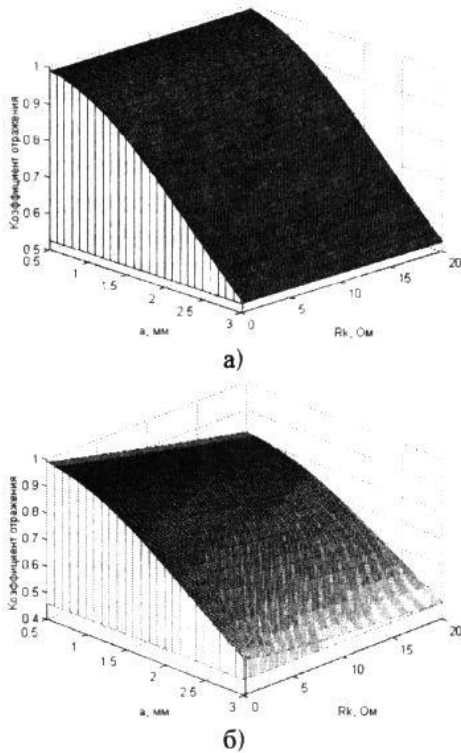


Рис. 2

На рис.2-а, б представлены зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны от размера ячеек сетеполотна и от контактного сопротивления между элементами петельной структуры (рис.2-а – вектор E в падающей электромагнитной волне колеблется вдоль горизонтали (вдоль оси X); рис. 2-б – вектор E колеблется вдоль вертикали (вдоль оси Y)).

Можно видеть, что при колебаниях вектора E вдоль горизонтали коэффициент отражения практически не зависит от контактного сопротивления между элементами структуры, но быстро увеличивается с уменьшением размера ячейки. Например, при размере ячейки 3 мм, независимо от контактного сопротивления, он составляет примерно 0,523, а при размере ячейки 0,5 мм – примерно 0,986, то есть очень

близок к единице (отражающая поверхность считается тем лучше, чем коэффициент отражения ближе к 1).

Когда же вектор E колеблется вдоль вертикали, коэффициент отражения зависит как от размера ячеек (сравнительно медленно увеличиваясь с их уменьшением), так и от контактного сопротивления между элементами структуры (быстро уменьшаясь с его увеличением).

Так, например, при размере ячейки 3 мм и контактном сопротивлении 20 Ом коэффициент отражения составляет 0,464, при контактном сопротивлении 2,5 Ома – 0,511. При размере же ячейки 0,5 мм и контактном сопротивлении 20 Ом он равен 0,814, а при контактном сопротивлении 2,5 Ома – 0,961.

Коэффициент отражения 0,96, как правило, удовлетворяет предъявляемым к отражающей поверхности требованиям, однако, во-первых, получить такой малый размер ячейки при данном диаметре микропроволоки трудно, а, во-вторых, использовать большие усилия, растягивающие сетку и необходимые для получения такого сравнительно малого контактного сопротивления, нежелательно.

Таким образом, чтобы получить удовлетворяющий требованиям коэффициент отражения при не очень малых размерах ячеек и не очень больших усилиях растяжения, нами была сделана попытка использовать для получения отражающей поверхности стальную микропроволоку, покрытую слоем никеля толщиной 1,3...1,5 мкм. При этом физико-механические свойства микропроволоки практически не менялись, а контактное сопротивление уменьшалось существенно – оно составило 3-4 Ома при натяжении микропроволоки 0,01...0,02 Н и десятые доли Ома при натяжении 0,15...0,20 Н.

На коэффициент отражения при колебаниях вектора E в падающей электромагнитной волне в направлении горизонтали покрытие микропроволоки никелем согласно рис.2-а практически не сказывается, а на коэффициент же отражения при колебании вектора E в направлении вертикали сказывается значительно. Так, например,

при размере ячейки 3мм коэффициент отражения при контактном сопротивлении несколько десятых долей Ома составляет примерно 0,535, а при размере ячейки 0,5 мм равен 0,990.

Коэффициент отражения 0,96 при этом контактном сопротивлении получается при размере ячейки, равном примерно 0,9 мм, что вполне достижимо при этом диаметре проволоки и, кроме того, не требует больших усилий при растяжении образца для достижения нужного контактного сопротивления.

Различная зависимость коэффициента отражения от контактного сопротивления при колебаниях вектора E в направлении горизонтали и в направлении вертикали связана с тем, что контактное сопротивление сильно сказывается на сопротивлении микроволокон, расположенных вдоль вертикали, и практически не сказывается на сопротивлении микроволокон, расположенных вдоль горизонтали.

Еще одним важным свойством радиотражающей поверхности является анизотропия коэффициента отражения. В качестве характеристики анизотропности можно использовать коэффициент K , равный, например, отношению коэффициента отражения при колебаниях вектора E вдоль вертикали к коэффициенту отражения при колебаниях вектора E вдоль горизонтали (рис.3). Чем этот коэффициент ближе к 1, тем лучше отражающая поверхность.

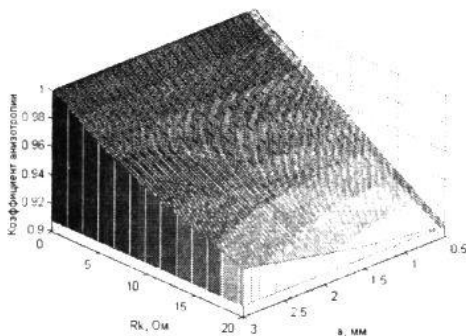


Рис. 3

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента анизотропности от контактного сопротивления и размера ячеек. Можно видеть, что чем меньше контактное сопро-

тивление, тем слабее сказывается размер ячеек на коэффициенте анизотропности. При этом, чем больше контактное сопротивление, тем сильнее коэффициент анизотропности отличается от 1. Наиболее близко к 1 он приближается при малых контактных сопротивлениях, то есть при покрытии микропроволоки никелем.

Сетки из микроволокон, помимо использования в качестве отражающей поверхности антенн, часто используются также в качестве экранов для защиты проводников от электромагнитного излучения. Экран тем лучше, чем меньше коэффициент пропускания сетки, рассчитать который можно, если из 1 отнять коэффициент отражения.

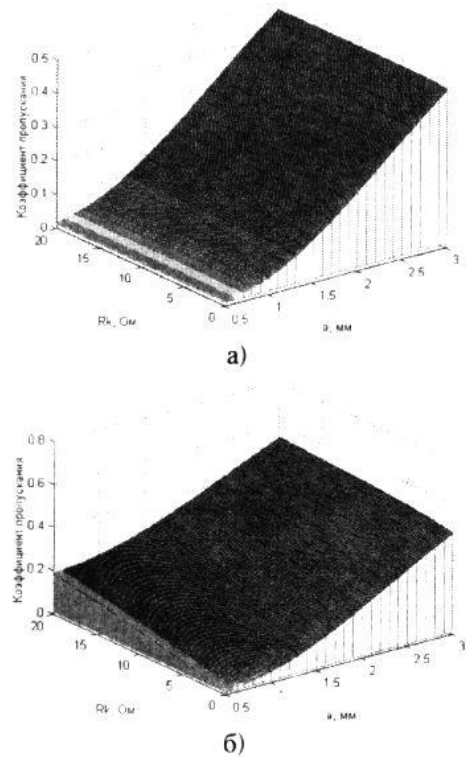


Рис. 4

На рис.4-а,б приведены зависимости коэффициента пропускания от контактного сопротивления и от размера ячеек. (рис.4-а – вектор E в падающей электромагнитной волне колеблется вдоль горизонтали (вдоль оси X), рис.4-б – вектор E колеблется вдоль вертикали (вдоль оси Y)). Как и в случае коэффициента отражения, можно видеть, что коэффициент пропускания при колебаниях вектора E в падающей элек-

тромагнитной волне в направлении горизонтали практически не зависит от контактного сопротивления. При колебаниях же вектора E в направлении вертикали – зависит от него в большой степени, увеличиваясь с ростом контактного сопротивления. В обоих случаях коэффициент пропускания уменьшается с уменьшением размера ячеек.

Лучшие результаты, чем в случае покрытия никелем, может дать покрытие микропроволоки золотом.

ВЫВОДЫ

1. Теоретически рассмотрено влияние размеров ячеек и контактного электрического сопротивления между элементами структуры кулирного металлического трикотажа с одинаковым размером ячеек по вертикали и по горизонтали на его способность отражать и пропускать электромагнитные волны.

2. При колебаниях вектора E в падающей электромагнитной волне в направлении горизонтали контактное сопротивление практически не сказывается на коэффициенте отражения, а при колебаниях вектора E в направлении по вертикали –

коэффициент отражения быстро уменьшается с увеличением контактного сопротивления. Уменьшение размера ячеек в обоих случаях приводит к увеличению коэффициента отражения. Наилучшие результаты получаются при покрытии микропроволоки металлом, обладающим малым контактным сопротивлением, например, никелем и золотом.

3. Коэффициент анизотропии сетеполотна в большой степени зависит от контактного сопротивления: чем меньше контактное сопротивление, тем меньше анизотропность. Коэффициент пропускания сеткой электромагнитной волны также сильно зависит от контактного электрического сопротивления между элементами структуры сетеполотна и от размера ячеек. Он увеличивается с ростом контактного сопротивления и с увеличением размера ячеек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявин Л.А. и др. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1997, №3. С.66...69.

Рекомендована кафедрой технологии трикотажного производства. Поступила 03.10.03.