

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СРЕД ДЛЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН

© 2016 г. О.И. ЯСТРЕБЦОВА

Московский технический университет связи и информатики  
e-mail: yastrebtsova@rambler.ru

Микрополосковые антенны – это очень широко применяемый класс антенн, что обусловлено целым рядом факторов, в том числе их низкопрофильностью, возможностью создания по технологии гибридных интегральных схем, а также возможностью обеспечения работы в нескольких частотных диапазонах и с разной поляризацией.

Одной из основных проблем для микрополосковых антенн является возбуждение поверхностных волн, что приводит к низкой эффективности излучения, а в случае, когда антенна располагается на подложке конечных размеров, происходит излучение с торцов подложки, что приводит к деформации диаграммы направленности. Излучение может произойти и в случае неоднородности слоя диэлектрика.

Когда речь идет о микрополосковой антенной решетке, возбуждение поверхностных волн приводит к сильному взаимовлиянию элементов решетки друг на друга, что ухудшает отношения сигнал/шум и сигнал/помеха, а также, в случае фазированной антенной решетки, искажает оценку направления прихода сигнала (DOA – direction-of-arrival) [1]. Помимо этого, может возникнуть явление «слепого пятна» (scan blindness), выражающееся в отсутствии излучения при определенных углах сканирования [2].

Поверхностные волны являются столь большой проблемой из-за того, что слой диэлектрика, который необходим для любой микрополосковой антенны, всегда поддерживает хотя бы одну поверхностную волну. Количество возбуждаемых типов поверхностных волн для однослойной среды определяется из следующих условий:

$$n\pi < \sqrt{\omega^2 \varepsilon_1 \mu_1 - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0} H_1 < (n+1)\pi, \quad (1)$$

где  $(n+1)$  - количество типов электрических поверхностных волн,

$$(n - \frac{1}{2})\pi < \sqrt{\omega^2 \varepsilon_1 \mu_1 - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0} H_1 < (n + \frac{1}{2})\pi, \quad (2)$$

где  $n$  - количество типов магнитных поверхностных волн (у магнитных волн существует отсечка).

Известно, что токи, расположенные в плоскости, способны, согласно уравнениям Максвелла, возбуждать как электрические, так и магнитные волны [3], поэтому даже при тонкой подложке всегда существует одна электрическая поверхностная волна (согласно условию (1)).

Анализ однослойной среды можно, в том числе, проводить методом поперечного резонанса [4], при котором нахождение дисперсионного уравнения осуществляется путем обеспечения согласования волн на границе раздела диэлектрик-воздух. Если применить этот принцип к двухслойной диэлектрической среде, то дисперсионные уравнения усложнятся и будут содержать параметры уже двух слоев диэлектриков, что может привести к появлению зон отсечки для поверхностных волн при определенном соотношении параметров среды. Действительно, двухслойная среда позволяет работать при одновременной отсечке электрических и магнитных поверхностных волн. Условия, накладываемые при этом на параметры двухслойной подложки, приведены в [5].

Для подтверждения правильности полученных условий отсечки двухслойная среда с соответствующими параметрами была использована для микрополосковой антенны [6], возбуждаемой перекрещенными щелями (рис. 1). Такая конструкция является одной из базовых для создания многодиапазонных антенн, позволяющих работать в ортогональных поляризациях. Применяется она, в том числе, и в подвижной связи, где ее используют для работы с наклонными поляризациями.

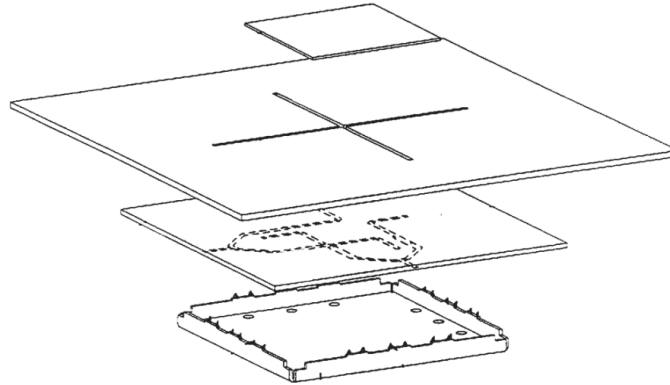


Рис. 1. Микрополосковая антенна, возбуждаемая перекрещенными щелями, из [6].

Изначально в качестве диэлектрика использовался материал с диэлектрической проницаемостью в пределах  $\epsilon_r = 1,04 \div 1,1$ , то есть близкой к диэлектрической проницаемости воздуха, однако при этом все равно возбуждается низший тип электрической поверхностной волны.

КСВ антенны и ее диаграмма направленности приведены на рис. 2 (рабочая полоса – 810-900 МГц). Развязка по поляризации составляет 25 дБ.

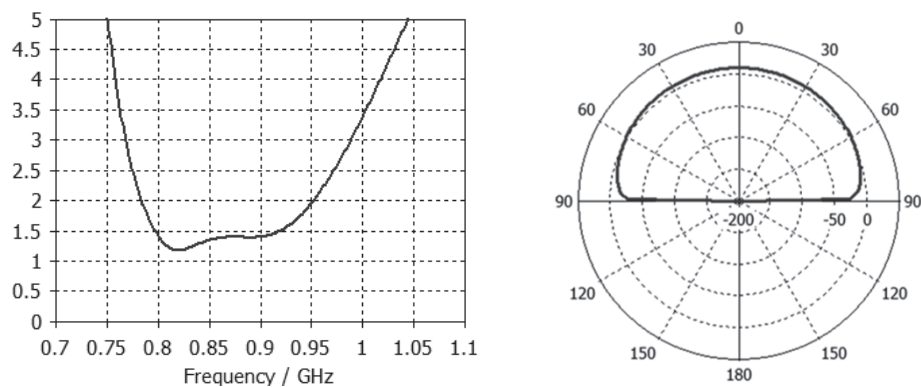


Рис. 2. КСВ и диаграмма направленности исходной микрополосковой антенны.

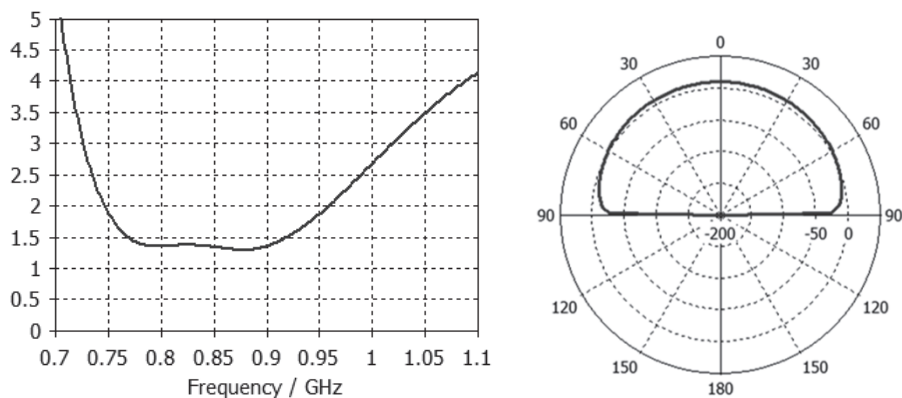


Рис. 3. КСВ и диаграмма направленности микрополосковой антенны при добавлении дополнительного слоя диэлектрика.

Далее с учетом условий одновременной отсечки электрических и магнитных поверхностных волн в двухслойных средах, поверх излучателя был добавлен слой диэлектрика с  $\epsilon_r = 2,1$ . При этом был несколько изменен размер излучателя, все остальные геометрические размеры были сохранены, что является одним из достоинств такой конструкции, так как элементы, расположенные ниже и выше экрана, в котором прорезаны щели, могут оптимизироваться отдельно. В результате были получены характеристики антенны, приведенные на рис. 3 (полоса 770-900 МГц). Развязка по поляризации - 32 дБ, что значительно лучше исходного варианта.

Из сравнения характеристик исходной антенны и антенны с дополнительным слоем видно, что произошло некоторое расширение полосы, однако для проверки того, связано ли это действительно с отсутствием поверхностных волн, следует определить степень взаимодействия двух идентичных элементов одной поляризации, расположенных на расстоянии половины длины волны друг от друга. На рис. 4 приведены S-параметры для исходной антенны (кривые (1)) и для антенны с многослойной средой (кривые (2)). Рабочая полоса одиночного излучателя отмечена стрелкой. По параметру S11 можно определить степень рассогласования элементов за счет их взаимодействия, что проявляется в сдвиге рабочей полосы. Для исходной антенны оно оказывается более заметным, полоса сильно сужается и смещается, во втором случае ухудшение чуть меньшее. По параметру S21 определяется коэффициент передачи между элементами, здесь принципиального улучшения нет.

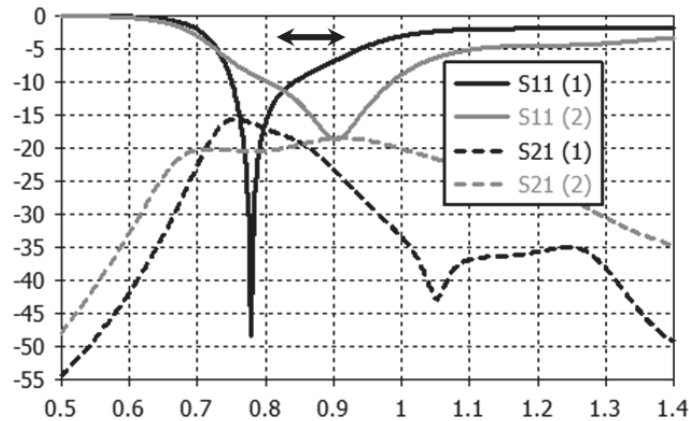


Рис. 4. S-параметры для двух исходных элементов и для двух элементов с дополнительным диэлектрическим слоем.

Из рис. 4 видно, что взаимодействие элементов приводит к ухудшению S-параметров в разной степени, из-за чего сложно оценить выигрыш от измененной конструкции. Поэтому в некоторых случаях рассматриваются характеристики, одновременно зависящие и от согласования, и от коэффициента передачи. В случае систем с технологией MIMO используется коэффициент корреляции, характеризующий корреляцию диаграмм направленности двух антенн [7]. Он может рассчитываться двумя способами: на основе диаграмм направленности и на основе S-параметров. Представляется более удобным использовать определение на основе S-параметров:

$$\rho = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2))(1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2))} \quad (3)$$

Еще одним таким же общим параметром является «diversity gain», то есть усиление, получаемое за счет использования данного метода разделения [7]. Эта характеристика, согласно определению, рассчитывается статистическими методами, однако существует приближительная формула, связывающая ее с коэффициентом корреляции:

$$G_{div} = 10\sqrt{1-|\rho|^2} \quad (4)$$

Максимальное значение этой величины - 10 дБ, что соответствует максимальному возможному выигрышу для двух некоррелированных антенн при вероятности ошибки 1%.

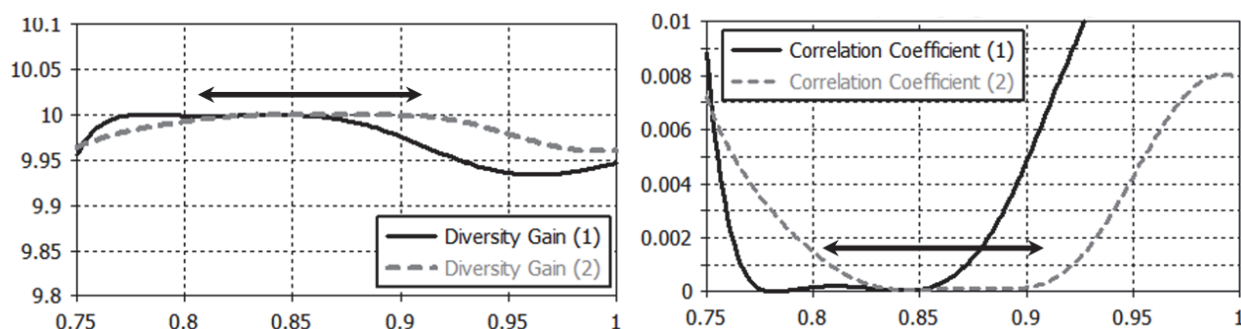


Рис. 5. Коэффициент корреляции и «diversity gain» для исходной антенны и антенны при добавлении слоя.

Параметры (3) и (4) были рассчитаны для исходной антенны и антенны при добавлении слоя (рис. 5).

В пределах рабочей полосы можно отметить улучшение этих параметров. В исходной антенне из-за взаимодействия элементов происходит значительный сдвиг рабочей полосы в сторону нижних частот, что не наблюдается при использовании двухслойной подложки. Это свидетельствует об отсутствии поверхностных волн – уменьшается взаимодействие между элементами, что приводит к уменьшению рассогласования и улучшению развязки элементов.

Таким образом, в работе подтверждается положительное влияние, оказываемое на характеристики микрополосковой антенны использованием вместо однослойной подложки двух слоев диэлектриков, параметры которых удовлетворяют условиям отсутствия поверхностных электрических и магнитных волн.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pasala K.M., Friel E.M. Mutual coupling effects and their reduction in wideband direction of arrival estimation. // IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. – 1994, v. 30, № 4, p. 1116-1122.
2. Mailloux R.J. Phased array antenna handbook. 2<sup>nd</sup> ed. – Norwood: Artech House, 2005, 515 p.
3. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – М.: Радио и связь, 1983, 296 с.
4. Чебышев В.В. Микрополосковые антенны в многослойных средах. – М.: Радиотехника, 2007, 159 с.
5. Чебышев В.В., Ястребцова О.И. Электродинамический анализ волн, распространяющихся в многослойных средах микрополосковых антенн. // ТСотт - Телекоммуникации и транспорт. – 2016, т.10, № 8, 2016, с. 3-8.
6. Патент SE 9704642-9, 1997
7. John D., Volakis L. Antenna engineering handbook. – USA: McGraw-Hill, 2007, 1755 p.