

## МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ УГЛОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

О. И. Ястребцова

**В** работе предлагается метод улучшения широкоугольных свойств микрополосковых антенных решеток с точки зрения исключения эффекта «ослепления» из требуемого диапазона углов сканирования путем перехода от однослойной диэлектрической подложки к двухслойной. Для двухслойных диэлектрических подложек даются дисперсионные уравнения, позволяющие определить характеристики поверхностных волн, а также графики отсечки высших типов волн и дисперсионные кривые, что позволяет отметить изменение структуры поверхностной волны при переходе к двухслойной диэлектрической подложке. Сравнение графиков максимально допустимых углов сканирования для однослойных и двухслойных диэлектрических подложек показывает, что использование двухслойной подложки при соответствующем образом подобранных параметрах диэлектрических слоев позволяет добиться расширения сектора сканирования без увеличения общей толщины подложки.

**Ключевые слова:** антенные решетки, микрополосковые антенны, широкоугольные свойства, поверхностные волны, ослепление.

Использование микрополосковых антенных решеток представляется перспективным для различных спутниковых применений [1] в связи с их малыми габаритами, малым весом, отсутствием выступающих элементов, а также возможностью перенастроить положение луча путем электрического сканирования. В связи с этим вопрос изменения коэффициента усиления микрополосковой антенной решетки при сканировании представляется актуальным. В случае использования больших антенных решеток при сканировании может возникнуть эффект «ослепления» антенной решетки, когда в определенном направлении излучение решетки нарушается.

Согласно исследованиям [2], «ослепление» связано с возбуждением в диэлектрической подложке микрополосковых антенных решеток поверхностных волн. Угол «ослепления» возникает при таком угле сканирования, когда в решетке устанавливается фазовое распределение, совпадающее в местах расположения излучателей с фазой поля поверхностной волны [2]. Эта формулировка точна для бесконечной антенной решетки, так как по определению поверхностная волна распространяется в бесконечном слое диэлектрика на проводящем экране. Для практически реализуемых конструкций антенных решеток эффект «ослепления» становится тем более заметным, чем больше площадь антенной решетки.

При использовании классической однослойной диэлектрической подложки с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  и толщиной слоя  $H_1$  фазовые постоянные поверхностных волн определяются в приближении бесконечного слоя диэлектрика на проводящем экране на основе дисперсионных уравнений (1) и (2) для поверхностных волн электрического и магнитного типов соответственно:

$$\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} \gamma_1 H_1 \operatorname{tg}(\gamma_1 H_1) = \gamma_0 H_1; \quad (1)$$

$$-\frac{\mu_0}{\mu_1} \gamma_1 H_1 \operatorname{ctg}(\gamma_1 H_1) = \gamma_0 H_1, \quad (2)$$

где  $\gamma_1 = \sqrt{k_1^2 - \beta^2}$  и  $\gamma_0 = \sqrt{\beta^2 - k_0^2}$  – поперечные волновые числа в слое диэлектрика и в воздухе соответственно;  $k_1$  и  $k_0$  – волновые числа.

Максимальная толщина слоя, при которой в подложке возбуждается только одна поверхностная волна электрического типа, определяется из условия (3), обеспечивающего отсечку поверхностной волны магнитного типа и поверхностных волн высших типов [3]:

$$\frac{H_1}{\lambda} < \frac{1}{2c\sqrt{\epsilon_1\mu_1 - \epsilon_0\mu_0}}. \quad (3)$$

Для приближенного определения максимально допустимых углов сканирования при прямоугольной сетке расположения излучателей на основе данных о поверхностной волне и периоде решетки были сформулированы следующие условия [4]:

$$k_0 \sin \theta_{0\max} < \left| \frac{\beta}{2\pi/d_x} \right| < \frac{2\pi}{d_x} - k_0 \sin \theta_{0\max}; \quad (4)$$

$$k_0 \sin \theta_{0\max} < \left| \frac{\beta}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{d_x}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{d_y}\right)^2}} \right| < \sqrt{\left(\frac{2\pi}{d_x}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{d_y}\right)^2} - k_0 \sin \theta_{0\max},$$

где  $\beta$  – фазовая постоянная поверхностной волны;  $\sin \theta_{0\max}$  – угол «ослепления», ближайший к

направлению, перпендикулярному поверхности решетки;  $d_x, d_y$  – расстояния между излучающими элементами. Знаком  $\lfloor \dots \rfloor$  обозначена операция взятия остатка от деления. В случае возбуждения в диэлектрической подложке нескольких поверхностных волн, эти условия должны проверяться для каждой волны отдельно. Первое условие в системе (4) обеспечивает отсутствие «ослепления» при сканировании в плоскостях  $E$  и  $H$ , второе – при сканировании «по диагонали» сетки расположения излучателей.

Таким образом, угол «ослепления» и, как следствие, сектор допустимых углов сканирования микрополосковых антенных решеток (без учета диаграммы направленности излучающего элемента и расширения луча по мере его отклонения) определяется параметрами распространяющейся в диэлектрическом слое поверхностной волны, то есть параметрами диэлектрической подложки, и периодом решетки.

Для иллюстрации ограничений, накладываемых на сектор углов сканирования эффектом «ослепления», были построены зависимости углов «ослепления» (рис. 1), ближайших к направлению, перпендикулярному поверхности решетки, для подложек из ФЛАН (фольгированный листовый арилокс наполненный) [1, 6] в зависимости от толщины подложки в миллиметрах (обозначено  $H$ ). Частота была взята равной 8,2 ГГц, расстояние между излучающими элементами – полуволновое.

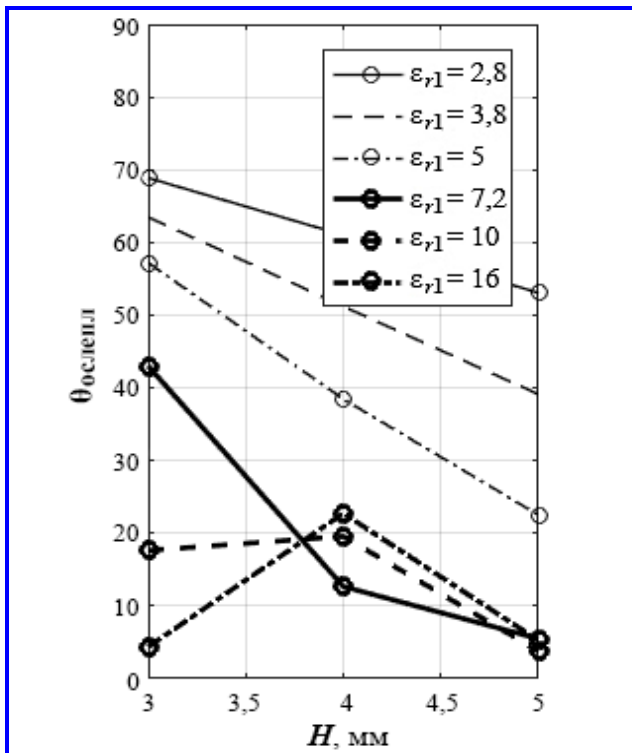


Рис. 1. Предельно допустимые углы сканирования для однослойных диэлектрических подложек при полуволновом расстоянии между элементами

В случае расстояния между элементами, равного  $0,6\lambda$ , предельные углы сканирования оказываются равными  $32^\circ$  для относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{r1} = 2,8$  при толщине подложки 4 мм,  $27^\circ$  – при толщине подложки 5 мм. Использование  $\epsilon_{r1} = 7,2$  – позволяет осуществлять сканирование в пределах  $20^\circ$  при толщине подложки 3 мм и до  $7^\circ$  – при 4 мм. Диэлектрическая подложка с  $\epsilon_{r1} = 10$  при толщине слоя 5 мм допускает сканирование до  $18^\circ$ .

Учет эффекта «ослепления» приводит к большим ограничениям на сектор углов сканирования, чем исключение из зоны видимости дифракционных лепестков, так как первый угол «ослепления» возникает обязательно до первого дифракционного лепестка с учетом того, что поверхностные волны – медленные волны. При определенном сочетании параметров подложки и межэлементных расстояний, ослепление может возникнуть и в направлении, перпендикулярном поверхности решетки.

На основе приведенных выше значений предельных углов сканирования можно сделать вывод, что при проектировании микрополосковых антенных решеток с классической однослойной подложкой необходимо выбирать достаточно тонкие по сравнению с длиной волны диэлектрические подложки с небольшой диэлектрической проницаемостью и расстоянием между элементами, близким к полуволновому.

В качестве метода улучшения широкоугольных свойств микрополосковых антенных решеток в данной работе предлагается использовать метод перехода от однослойных диэлектрических подложек к двухслойным диэлектрическим подложкам.

Согласно проведенному электродинамическому анализу [8] условий распространения поверхностных волн в двухслойной диэлектрической среде на проводящем экране при диэлектрической проницаемости верхнего слоя с  $\epsilon_1$  толщиной  $H_1$  и нижнего слоя, примыкающего к проводящему экрану, с  $\epsilon_2$  толщиной  $H_2$ , дисперсионные уравнения для волн электрического и магнитного типов имеют следующий вид (выражения (5) и (6) соответственно) в приближении бесконечного слоя диэлектрика на проводящем экране:

$$\epsilon_1 \epsilon_2 \gamma_0 \gamma_1 - \epsilon_1^2 \gamma_0 \gamma_2 \tan \gamma_1 H_1 \tan \gamma_2 H_2 - \epsilon_0 \epsilon_2 \gamma_1^2 \tan \gamma_1 H_1 - \epsilon_0 \epsilon_1 \gamma_1 \gamma_2 \tan \gamma_2 H_2 = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\mu_1 \mu_2} + \frac{\gamma_0 \gamma_2}{\mu_0 \mu_2} \tan \gamma_1 H_1 - \left( \frac{\gamma_1}{\mu_1} \right)^2 \tan \gamma_1 H_1 \times \quad (6)$$

$$\times \tan \gamma_2 H_2 + \frac{\gamma_0 \gamma_1}{\mu_0 \mu_1} \tan \gamma_2 H_2 = 0,$$

где  $\gamma_1 = \sqrt{k_1^2 - \beta^2}$  – поперечное волновое число в верхнем слое диэлектрика;  $\gamma_2 = \sqrt{k_2^2 - \beta^2}$  – поперечное волновое число в нижнем слое диэлектрика;  $\gamma_0$  определяется так же, как и для случая однослойной среды;  $k_0, k_1, k_2$  – волновые числа в соответствующих диэлектрических слоях;  $\beta$  – фазовая постоянная поверхностной волны.

В отличие от выражений (1) и (2) для однослойных сред, для которых применим метод графического решения путем построения на одном графике тангенсоид и котангенсоид совместно с окружностью, определяющей связь поперечных волновых чисел в слое диэлектрика и в воздухе, для двухслойной среды выражения (5) и (6) не представляется возможным решать аналогичным способом, поэтому к ним применимы только методы численного решения. При этом следует учесть, что с учетом структуры поля поверхностной волны в двухслойной диэлектрической среде фазовая постоянная  $\beta$  может принимать значения в пределах  $[k_0, \max(k_1, k_2)]$ .

В сравнении с хорошо известными аналогичными зависимостями для однослойной диэлектрической среды на проводящем экране [9] можно отметить изменение структуры поверхностных волн, в частности, предельные значения замедления для поверхностных волн электрического и магнитного типов отличаются, тогда как в однослойной среде они стремились к одинаковой величине  $k_1/k_0 = \sqrt{\epsilon_1/\epsilon_0}$ .

Для анализа условий обеспечения отсечки высших типов поверхностных волн в двухслойной диэлектрической среде на проводящем экране были построены рис. 2 и 3, на которых линиями для определенной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{r1}$ ) показана максимальная толщина верхнего ( $H_1$ ) и нижнего ( $H_2$ ) слоя, при которых появляется первая поверхностная волна магнитного типа. Таким образом, допустимая область для обеспечения одноволнового режима работы располагается левее соответствующей линии на рис. 2 и 3. При построении рис. 2 нижний слой был выбран в виде прослойки воздуха ( $\epsilon_{r2} = 1$ ), на рис. 3 в качестве нижнего слоя был взят диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{r2} = 2,5$ .

Можно отметить, что наклон кривых на рис. 2 и 3 определяется диэлектрической проницаемостью нижнего слоя диэлектрика, тогда как точки начала кривых при толщине нижнего слоя, равной нулю, совпадают, что соответствует случаю однослойной диэлектрической подложки, выполненной с теми же диэлектрическими проницаемостями, что и верхний слой диэлектрика в случае двухслойной диэлектрической среды.

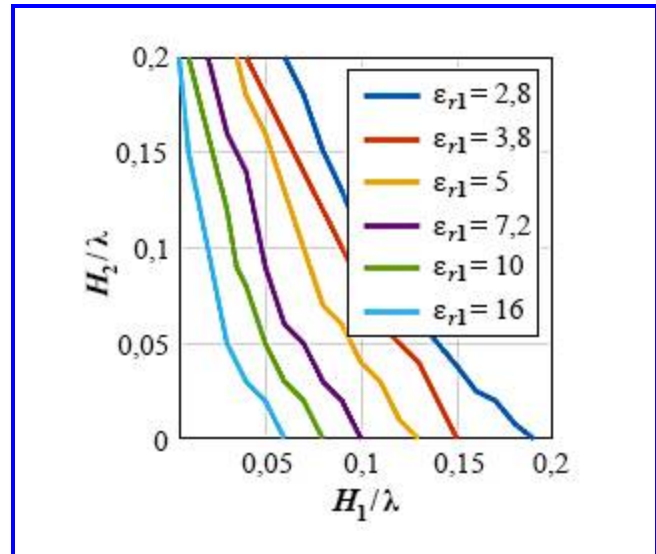


Рис. 2. Отсечка поверхностных волн высших типов при нижнем слое в виде прослойки воздуха

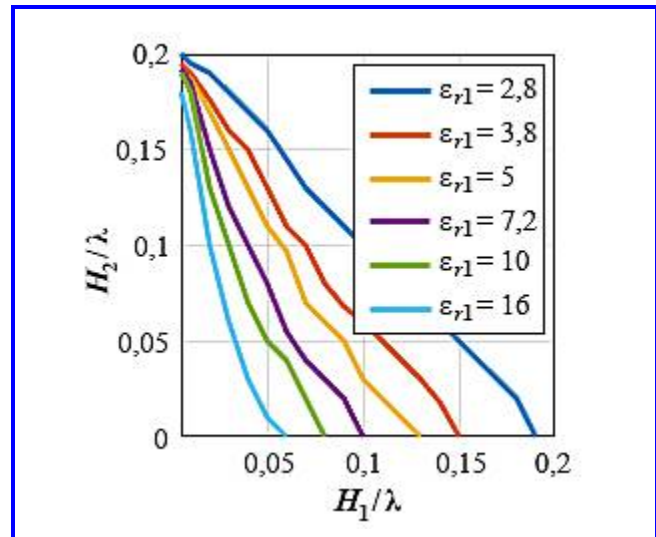


Рис. 3. Отсечка поверхностных волн высших типов при нижнем слое в виде диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью 2,5

Для определения предельных углов сканирования в случае двухслойных подложек микрополосковых антенных решеток можно использовать те же ограничения (4) на сектор углов сканирования, отличие будет только в методике определения фазовых постоянных поверхностных волн, которые теперь следует определять как решения уравнений (5) и (6). Применимость этого метода для двухслойных диэлектрических подложек была показана в работе [4].

На рис. 4 приведены графики углов «ослепления», ближайших к направлению, перпендикулярному поверхности решетки, для двухслойных диэлектрических подложек с верхним слоем из

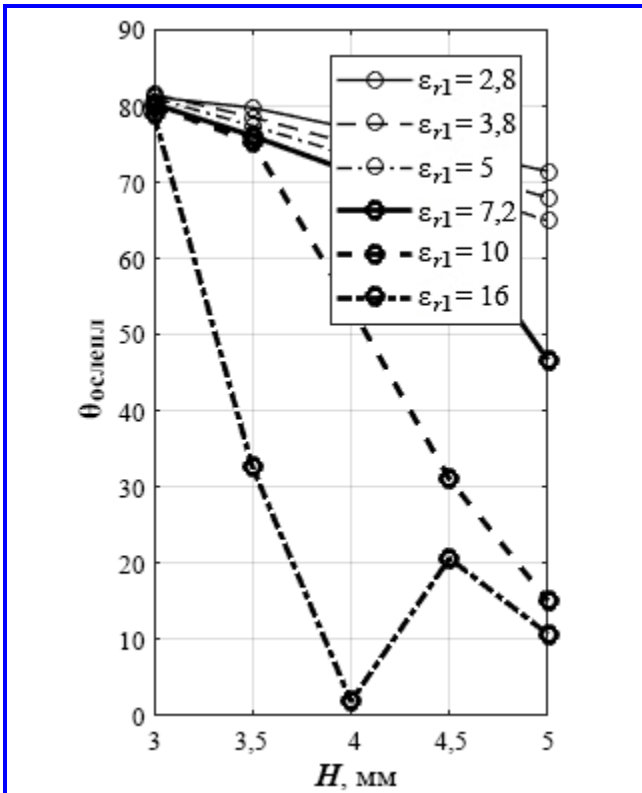


Рис. 4. Пределно допустимые углы сканирования для двухслойных диэлектрических подложек при полуволновом расстоянии между элементами

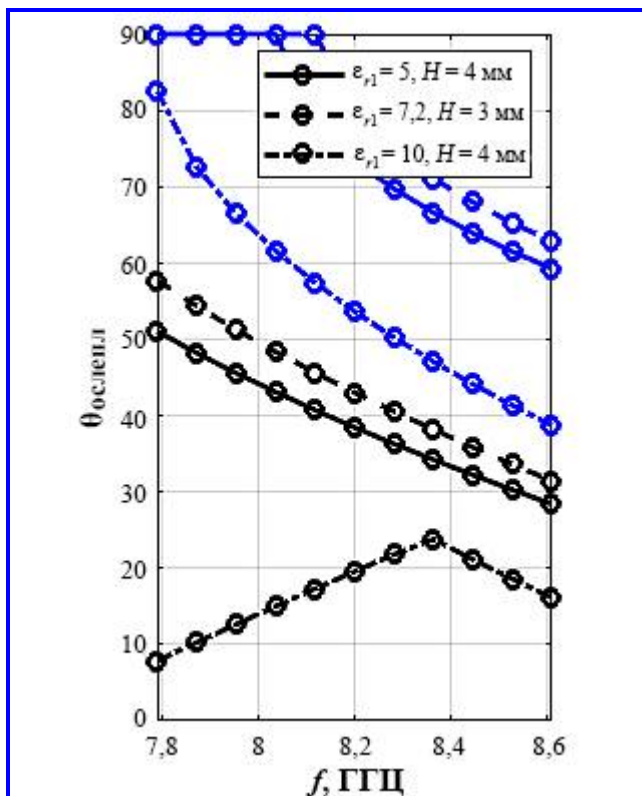


Рис. 5. Смещение углов «ослепления» при изменении частоты

ФЛАН в зависимости от толщины подложки в миллиметрах. По горизонтальной оси отмечена суммарная толщина обоих слоев для двухслойной подложки (обозначено как  $H$ ). В качестве нижнего, прилегающего к проводящему экрану слоя, для примера была взята воздушная прослойка толщиной 2 мм, верхний слой выполнен из тех же материалов ( $\varepsilon_{r2}$ ), что и для однослойных подложек на рис. 1. Частота была взята равной 8,2 ГГц, расстояние между излучающими элементами – полуволновое.

Из сравнения рис. 4 для двухслойных подложек и рис. 1 для однослойных подложек видно, что происходит улучшение широкоугольных свойств микрополосковых антенных решеток при переходе к двухслойной диэлектрической подложке по сравнению с однослойной подложкой той же толщины при определенным образом подобранных параметрах диэлектрических слоев.

Электродинамический анализ однослойной среды (выражения (1) и (2)) и двухслойной среды (выражения (5) и (6)) выполнялся в приближении бесконечного слоя диэлектрика на проводящем экране, то есть без учета излучающих элементов. Анализ с учетом периодического расположения на слое или слоях диэлектрика металлических элементов размером до  $0,1\lambda$  при периоде решетки от  $0,5\lambda$  до  $0,8\lambda$  показал, что максимальная ошибка определения фазовых постоянных поверхностных волн  $\beta$  как для случая одного слоя диэлектрика, так и для двух слоев диэлектриков составляет до 4% в зависимости от параметров диэлектрических слоев, периода решетки и размеров излучающих элементов, что приводит к ошибке определения угла «ослепления» в пределах примерно  $3^\circ$ . Это позволяет сделать вывод, что можно пренебречь учетом влияния размеров излучающих элементов на определение углов «ослепления», так как ширина «провала» в случае конечных антенных решеток может составлять до  $10^\circ$  по уровню 0,7 от уровня диаграммы направленности излучателя в решетке вблизи угла «ослепления».

На рис. 5 приведены частотные зависимости углов «ослепления», ближайших к направлению, перпендикулярному поверхности решетки, для трех точек рис. 1 (однослойные подложки) и рис. 4 (двухслойные подложки). Для двухслойных подложек (черные линии) как  $H$  обозначается суммарная толщина обоих слоев, при этом нижний слой образован прослойкой воздуха толщиной 2 мм, что составляет  $0,055\lambda$  на частоте 8,2 ГГц. Рассматривалась полоса 10%, то есть  $8,2 \text{ ГГц} \pm 410 \text{ МГц}$ . Серые кривые соответствуют однослойным подложкам на



рис. 1 при тех же диэлектрических проницаемостях слоя, что и линии того же типа для двухслойных подложек, где из этого же диэлектрика выполнен верхний слой. Как  $H$  для кривых, соответствующих однослойным подложкам, обозначена толщина единственного слоя диэлектрика.

На основе рис. 5 можно сделать вывод, что переход к двухслойным диэлектрическим подложкам не приводит к усилению частотной зависимости эффекта «ослепления» по сравнению с однослойной подложкой, так как ход кривых смещения углов «ослепления» на рис. 5 для однослойных и двухслойных подложек аналогичен.

Таким образом, в работе предлагается метод улучшения широкоугольных свойств микрополосковых антенных решеток путем перехода от однослойной диэлектрической подложки к двухслойной диэлектрической подложке. При таком переходе изменяется структура и свойства распространяющейся в подложке поверхностной волны, и благодаря полученным дополнительным степеням свободы для оптимизации фазовой постоянной поверхностной волны становится возможным сместить угол «ослепления» дальше от направления, перпендикулярного поверхности решетки. При соответствующим образом подобранных параметрах диэлектрических слоев это позволяет добиться расширения сектора сканирования без увеличения общей толщины подложки. В работе приводятся графики, подтверждающие улучшение широкоугольных свойств микрополосковых антенных решеток при таком переходе, а также исследуются частотные зависимости эффекта «ослепления» как для однослойной, так и для двухслойной подложки, что свидетельствует о том,

что переход к двухслойной подложке не приводит к усилению смещения углов «ослепления» при изменении частоты.

### Литература

1. Миниатюрные бортовые антенны / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 159. – № 4. – С. 31 – 41.
2. Воскресенский Д. И. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / Д. И. Воскресенский, Р. А. Грановская. – М. : Радио и связь, 1981. – 432 с.
3. Условия отсутствия «ослепления» у микрополосковых антенных решеток / О. И. Ястребцова // Труды МАИ. – 2017. – Выпуск № 97.
4. Метод борьбы с явлением «ослепления» в микрополосковых антенных решетках / О. И. Ястребцова // Доклады VI Всероссийской микроволновой конференции «Московская микроволновая неделя». – Москва, ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова, 2018. – 28 – 30 ноября 2018 г. – С. 29 – 33.
5. Хансен Р. К. Сканирующие антенные системы СВЧ в 3 т. Т. 2 / под ред. Р. К. Хансена; пер. с англ. под ред. Г. Т. Маркова, А.Ф. Чаплина. – М. : Советское радио, 1969. – 496 с.
6. Моделирование бортовой микрополосковой антенны / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, В. С. Бочаров [и др.] // Антенны. – М. : Издательство «Радиотехника», 2016. – № 7(227). – С. 10 – 22.
7. Марков Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – М. : Энергия, 1975. – 528 с.
8. Электродинамический анализ волн в направляющих многослойных структурах / О. И. Ястребцова // Антенны. – М. : Издательство «Радиотехника», 2016. – № 12. – С. 22 – 32.
9. Вольман В. Ю. Техническая электродинамика / В. Ю. Вольман, В. И. Пименов, А. Д. Муравцов. – М. : Радио и Связь, 2000. – 536 с.

Поступила в редакцию 06.08.2019

*Ольга Игоревна Ястребцова, аспирант, т. 8 (965) 185-53-15, e-mail: yastrebtsova@rambler.ru.  
(Московский технический университет связи и информатики).*

## METHOD OF ENHANCING WIDE-ANGLE PROPERTIES OF MICROSTRIP ANTENNA ARRAYS

**O. I. Iastrebtsova**

*The article offers a method of enhancing wide-angle properties of microstrip antenna arrays in terms of exclusion of the 'blindness' effect from the required scanning angle range by replacing a one-layer dielectric substrate with a two-layer substrate. For two-layer dielectric substrates, dispersion equations that allow the determination of characteristics of surface waves, as well as high-order modes cut-off diagrams and dispersion curves that allow the detection of change in surface wave structure in case of replacement of a one-layer substrate with a two-layer substrate are provided. The comparison of the maximum permitted scanning angle diagrams for one-layer and two-layer dielectric substrates shows that the use of a two-layer substrate at properly chosen parameters of dielectric layers allows the expansion of the scanning sector without increasing the total thickness of the substrate.*

**Key words:** antenna arrays, microstrip antennas, wide-angle properties, surface waves, blindness.

### References

1. Miniature on-board antennas / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – M. : ‘VNIIEEM Corporation’ JC, 2017. – V. 159. – No. 4. – Pp. 31 – 41.
2. Voskresenskii D. I. Antennas and microwave devices. Design of phased antenna arrays / D. I. Voskresenskii, R. A. Granovskaia. – M. : Radio and communications, 1981. – 432 p.
3. Conditions for eliminating the scan blindness in microstrip antenna arrays / O. I. Iastrebtsova // MAI (Moscow Aviation Institute) Proceedings. – 2017. – Issue No. 97.
4. Method of prevention of scan blindness in microstrip antenna arrays / O. I. Iastrebtsova // Proceedings of VI<sup>th</sup> All-Russia Microwave Conference ‘Moscow Microwave Week’. – Moscow, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 2018. – November 28 – 30, 2018. – Pp. 29 – 33.
5. Hansen R. C. Microwave Scanning Antennas in 3 volumes. V. 2 / edited by R. C. Hansen; translation from English edited by G. T. Markov, A. F. Chaplin. – M. : Soviet Radio, 1969. – 496 p.
6. On-board microstrip antenna modeling / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondrateva, V. S. Bocharov [et al.] // Antennas. – M. : ‘Radio Engineering’ Publishing House, 2016. – No. 7(227). – Pp. 10 – 22.
7. Markov G. T. Antennas / G. T. Markov, D. M. Sazonov. – M. : Energia (Energy), 1975. – 528 p.
8. Electrodynamic analysis of waves in multi-layer guiding structures / O. I. Iastrebtsova // Antennas. – M. : ‘Radio Engineering’ Publishing House, 2016. – No. 12. – Pp. 22 – 32.
9. Volman V. Iu. Technical electrodynamics / V. Iu. Volman, V. I. Pimenov, A. D. Muravtsov. – M. : Radio and Communications, 2000. – 536 p.

*Olga Igorevna Iastrebtsova, Ph. D. Student, tel.: +7 (965) 185-53-15, e-mail: yastrebtsova@rambler.ru.  
(Moscow Technical University of Communication and Informatics).*