

Раздел II. Электродинамика и антенны

УДК 621.396.67

В.А. Обуховец

СКАНИРУЮЩАЯ ВОЛНОВОДНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УКРЫТИЕМ

При реализации электронного сканирования в фазированных антенных решетках возникает так называемый «эффект ослепления» решетки, характеризующийся резким возрастанием входного коэффициента стоячей волны и нарушением режима работы решетки. В литературе описаны несколько вариантов конструктивной доработки решетки, позволяющих расширить сектор сканирования. В настоящей работе представлены результаты исследования характеристик плоской волноводной антенной решетки при изменении угла сканирования. Проведены численные эксперименты по поиску способов расширения сектора сканирования. В качестве компьютерной модели исследовалась двумерная бесконечная периодическая решетка из прямоугольных волноводов с диэлектрическим укрытием, вставками в волноводы и с металлическими ребрами. Исследовано влияние толщины и параметров диэлектриков однослойного и многослойного укрытий, размеров металлических «ребер», являющихся продолжением стенок волновода на характеристики сканирующей решетки. Показано, что обеспечить расширение сектора сканирования в плоскости H значительно труднее. Для этого целесообразно применять многослойное диэлектрическое укрытие с оптимально подобранными параметрами материалов. Увеличение количества слоев укрытия позволяет не только расширить сектор сканирования, но и обеспечить меньшее значение КСВ во всем диапазоне углов. Наряду с использованием диэлектрических пластин исследовано применение системы металлических ребер, представляющих собой продолжение стенок волновода в плоскости H или в плоскости E . Показано, что подбором значения высоты ребер можно существенно улучшить характеристики сканирования решетки.

Фазированная антенная решетка; сканирование; прямоугольный волновод; диэлектрическое укрытие; металлические ребра; согласование; сектор сканирования.

V.A. Obukhovets

SCANNING WAVEGUIDE ARRAY WITH A DIELECTRIC COATING

The process of beam scanning in phased antenna arrays is investigating. The main difficulty in array designing procedure is the prediction of so called "blind scan angles". At this angles the input voltage standing wave ratio (VSWR) is increasing rapidly and the phased antenna array operation is violated. Several options of array structural improvements which allow to expand array scanning sector are described in known literature. The paper is devoted to the flat waveguide array scanning characteristics to investigation. Numerical experiments of the ways of increasing scanning sector are considered. Computer model of the studied array is based on the infinite periodic lattice of rectangular waveguides with a dielectric cover, inlays in waveguides and metal ribs. The effect of thickness and dielectric parameters of a single and multi-layer covers as well as the sizes of the metal "ribs", which are the extension of the waveguide walls, are discussed. It is shown that to ensure the expansion of the sector scanning in the H - plane is much more difficult than in E -plane. To do this, it is advisable to use a multi-layer dielectric cover with optimally matched parameters of materials. Increasing the number of cover layers allows not only to expand the scan angle sector, but also to provide minimal SWR throughout a range of angles.

Along with the use of dielectric plates it is investigated the use of metal ribs system representing a continuation of waveguide walls in the H-plane or in the E-plane. It is shown that the selection of edges heights can substantially improve the characteristics of the scanning grating.

Phased antenna array; scanning; rectangular waveguide; dielectric cover; metal ribs; matching; scanning angles sector.

Введение. Проектирование фазированных антенных решеток требует предсказания поведения их основных характеристик с высокой точностью. В частности, это касается режима сканирования луча решетки. Известно, что при сканировании возможно проявление эффекта «ослепления» ФАР [1–2]. Это означает, что при некоторых углах сканирования в диаграмме направленности решетки возникают глубокие «провалы». При этом резко возрастает входной коэффициент отражения, что приводит к рассогласованию решетки с питающим фидером и даже может послужить причиной срыва колебаний генератора. Эти неблагоприятные процессы являются следствием проявления эффектов взаимной связи между излучателями решетки [3–6, 12].

Наиболее точные способы вычислений коэффициентов взаимной связи обеспечивает метод интегральных уравнений. Для решеток с большим числом излучателей общепринято использовать модели ФАР в виде бесконечных периодических структур [3, 7]. Процесс проектирования решеток предполагает не только максимально точное предсказание углов «ослепления», но и исследование способов устранения этого эффекта путем смещения углов «ослепления» за пределы требуемого сектора сканирования.

К числу способов расширения сектора сканирования относят разработку внутренних дополнительных цепей, компенсирующих эффекты взаимосвязи излучателей («развязывающие многополюсники»); применение диэлектрических укрытий, вставок в волноводные излучатели, реактивных диафрагм, пассивных излучателей с реактивными нагрузками и т.д. [6–9].

Постановка задачи. Исследовать возможность расширения сектора сканирования волноводных фазированных антенных решеток за счет применения диэлектрических укрытий и дополнительных конструктивных элементов, представляющих собой продолжение стенок волноводных излучателей.

Целью настоящей работы является исследование характеристик сканирующей волноводной ФАР при использовании диэлектрических пластин в качестве укрытия и при применении металлических «ребер», являющихся продолжением стенок волновода, для целей широкоугольного согласования решетки.

Расчетная модель представляет собой двумерную периодическую решетку волноводных излучателей с бесконечно тонкими стенками. Размеры волноводов $22,8 \times 10,2$ мм. Периоды решетки равны d_x и d_y . Вычислительные эксперименты проводились с использованием программы HFSS [10].

Результаты вычислительных экспериментов. На рис. 1 и 2 приведены зависимости входного КСВ волноводного излучателя бесконечной периодической решетки на частоте 9 ГГц при сканировании в E и H – плоскостях: рис. 1 – для решетки с $d_x=30,5$ мм и $d_y=17,8$ мм; рис. 2 – для решетки $d_x=24,5$ мм и $d_y=12,7$ мм. Из сравнения результатов расчетов следует, что с увеличением периода решетки сектор сканирования сужается.

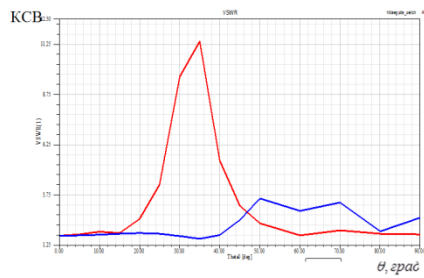


Рис. 1. Зависимость КСВ от угла сканирования при $d_x=30,5$ мм и $d_y=17,8$ мм

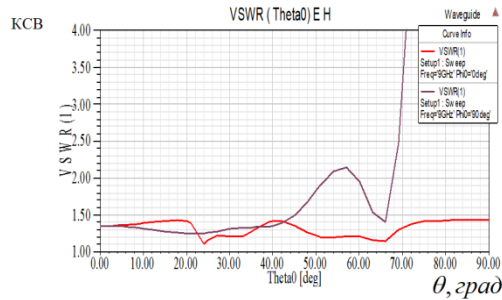


Рис. 2. Зависимость КСВ от угла сканирования при $d_x=24,5$ мм и $d_y=12,7$ мм

Применение диэлектрических укрытий. Из перечисленных выше способов решения данной проблемы наиболее привлекательным представляется применение диэлектрического укрытия [14, 16]. В простейшем случае это плоская пластина из диэлектрика с небольшими потерями в рабочем диапазоне частот. Такая пластина способна одновременно выполнять функцию антенного укрытия (обтекателя).

Представляет интерес исследование влияния подобного укрытия на согласование излучателей решетки и на сектор сканирования для пластин с различными значениями диэлектрической проницаемости, толщины и высоты расположения пластины над апертурой решетки. На рис. 3 приведены расчетные зависимости входного КСВ в H -плоскости от частоты для композитного материала *PTFE*, усиленного нетканым микростекловолокном (*duroid 5880*) с диэлектрической проницаемостью 1,98 [HFSS] при изменении толщины от 1 мм до 5 мм. Наибольшее подавление КСВ при угле 30^0 обеспечивает пластина толщиной 5 мм. Соответствующая характеристика в E -плоскости для этой толщины приведена на рис. 4.

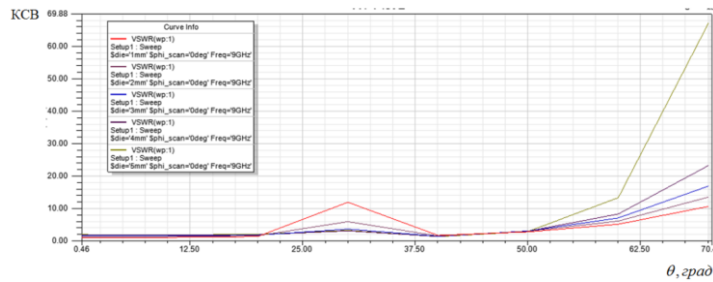


Рис. 3. Угловая зависимость КСВ при изменении толщины укрытия (пл.Н)

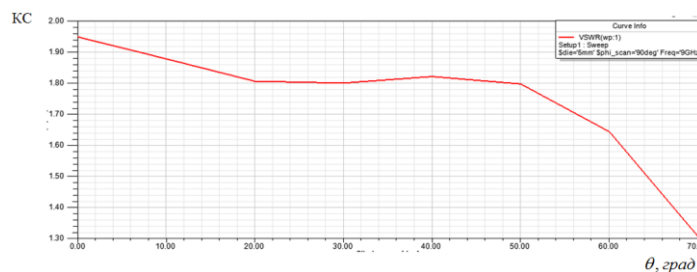


Рис. 4. Угловая зависимость КСВ при изменении толщины укрытия (пл.Е)

Увеличение количества слоев диэлектрика [17–20] позволяет повысить качество согласования в достаточно широком секторе углов сканирования. Так, на рис. 5 в качестве примера приведена характеристика согласования решетки в E -плоскости с двухслойным укрытием. Параметры слоев получены путем перебора с целью обеспечения $KCB \leq 2$ в максимально возможном секторе углов сканирования. К указанному выше первому слою добавлен второй согласующий слой толщиной $18 \div 20$ мм и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2,4$.

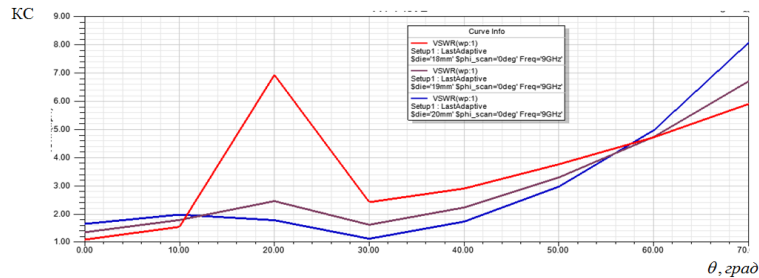


Рис. 5. Согласование при помощи двухслойного укрытия

Как следует из результатов моделирования, применение второго слоя улучшает согласование решетки при сканировании, а в направлении наиболее «опасного» угла сканирования 30° удается обеспечить КСВ, близкий к единице.

Решетка с металлическими согласующими «ребрами». Наряду с использованием диэлектрических пластин представляет значительный интерес применение еще одной «внешней» системы конструктивных элементов: металлических ребер и штырей [21]. Металлические ребра над апертурой решетки можно рассматривать, как продолжение стенок волновода. На рис. 6 показаны ребра 1 и 2, являющиеся продолжением узких стенок волноводов (выделены кружочками).

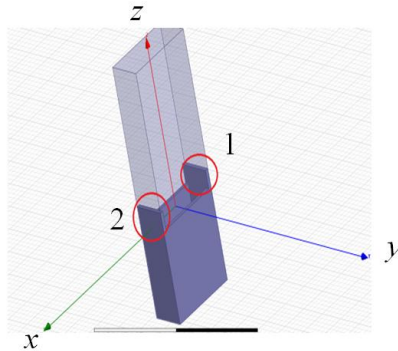


Рис. 6. Волноводный излучатель с металлическими «ребрами»

Численное моделирование характеристик такой решетки показывает возможность путем подбора высоты ребер (продолжение узких стенок волноводов) изменять величину КСВ в диапазоне частот (рис. 7). Семейство кривых на графике соответствует изменению высоты ребер от нуля (нижняя кривая) до 8 мм (верхняя характеристика) при изменении высоты с шагом 1 мм для синфазно возбужденной решетки. Подобные характеристики с ребрами, являющимися продолжением широких стенок волноводов, имеют несколько отличающийся вид, но общая тенденция их поведения сохраняется.

Моделирование работы решетки в режиме сканирования выявляет особенности влияния металлических ребер на зависимость величины входного КСВ от угла сканирования. Так, расчеты показывают, что решетка с ребрами в плоскости E ухудшает согласования при сканировании. Вместе с тем, решетка, у которой ребра образованы продолжением широких стенок волновода, способна обеспечить лучшее согласование. На рис. 7 приведена зависимость КСВ от угла сканирования для решетки с высотой ребер в H -плоскости, равной 3 мм.

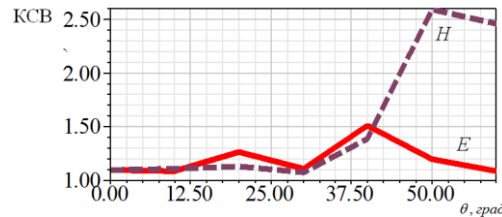


Рис. 7. КСВ решетки с металлическими «ребрами»

Рассмотренный вариант решетки позволяет увеличить сектор углов сканирования как в H -плоскости, так и в E -плоскости до величины 40° при $КСВ \leq 1,5$.

Выводы. Методами компьютерного моделирования исследованы варианты конструктивной доработки антенных решеток с целью расширения пределов сканирования луча.

По сравнению с традиционно применяемыми излучателями волноводного типа исследуемые конструкции позволяют увеличить сектор сканирования за счет применения диэлектрических укрытий и (или) усложнения волноводных излучателей путем добавления ребер, являющихся продолжением широких стенок волноводов.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что применение диэлектрических укрытий расширяет сектор сканирования исследуемой антенной решетки в E – плоскости с 25° до 42° (по $КСВ \leq 2$). Близкие результаты обеспечивает применение излучателей с металлическими ребрами. Максимальный угол сканирования для решетки из таких излучателей составляет 45° .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. Сер. «Мир радиоэлектроники»: пер. с англ. Р.Д. А.И. Синани. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.
2. Mailloux R.J. Phased Array Antenna Handbook. – Boston: Artech House, 1994.
3. Habashi A., Nourinia J., Ghobadi C. Mutual coupling reduction between very closely spaced patch antennas using low-profile folded split-ring resonators // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2011. – Vol. 10. – P. 862-865.
4. Farsi, S., H. Aliakbarian, B. Nauwelaers, G. A. E. Vandenbosch. Mutual coupling reduction between planar antenna by using a simple microstrip U-section // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2012. – Vol. 11, No. 9. – P. 1501-1503.
5. Сазонов Д.М. Многоэлементные антенные системы. Матричный подход. – М.: Радиотехника, 2015. – 143 с.
6. Амтей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток. – М.: Мир. – 1974. – 458 с.
7. Воскресенский Д.И., Степаненко В.И., Филитов В.С. и др. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: учебное пособие для вузов / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника. – 2003. – 632 с.
8. Kasyanov A.O., Obukhovets V.A. Blindness Angles in Microstrip Phased Arrays Patterns // 2000 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2000). Conference Proc. – Kharkov, Ukrain, Sept. 12-15 2000. – P. 280-282.

9. *Обуховец В.А., Касьянов А.О.* Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование. – М.: Радиотехника, 2006. – 240 с.
10. *Банков С.Е., Гутцайт Э.М., Курушин А.А.* Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. – М.: Оркада, 2012. – 240 с.
11. *Ben A. Munk.* Finite Antenna Arrays and FSS. – John Wiley & Sons, Inc. – 2003. – 357 p.
12. *Vendik O.G., Kozlov D.S.* A Novel Method for the Mutual Coupling Calculation Between Antenna Array Radiators // *IEEE Antennas & Propagation Magazine.* – 2015, No. 12. – P. 16-21.
13. *Ghosh, C. K., S.K. Parui.* Elimination of scan blindness of microstrip array by using I-shaped $\lambda/2$ resonator // *Microwave and Optical Technology Letters.* – 2014. – Vol. 56, No. 2. – P. 334-337.
14. *Мануилов М.Б., Синявский Г.П.* Волноводные антенные решетки с многослойными конечными диэлектрическими покрытиями // *Электромагнитные волны и электронные системы.* – 2010. – № 2. – С. 33-41.
15. *Isaa M.S.M., Langleyb R.J., Khamasb S., Isaa A.A.M., Zina M.S.I.M., Zakariaa Z., Harona N.Z., Ahmadc A.* A Technique of Scan Blindness Elimination for Planar Phased Array Antenna using Miniaturized EBG. 69:2 (2014) 11–15 (www.jurnalteknologi.utm.my) eISSN 2180–3722.
16. *Donzelli G., Capolino F., Boscolo S., Midrio M.* Elimination of Scan Blindness in Phased Array Antennas Using a Grounded-Dielectric EBG Material // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.* – 2007. – Vol. 6. – P. 106-108.
17. *Nikolic, M. M., A. Djordjevic, A. Nehorai.* Microstrip antennas with suppressed radiation in horizontal directions and reduced coupling // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2005. – Vol. 53, No. 11. – P. 3469-3476.
18. *Воскресенский Д.И. и др.* Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ. – М.: Радио и связь, 1988.
19. *Eom AS.-Y., Park H.-K., Jeon S.-J.* Shaping of flat-topped element patterns in a planar array of circular waveguides using a multilayered disk structure. Part II: Experimental study and comparison // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* – 2003. – Vol. 51, No. 5. – P. 1048-1053.
20. *McGill E.G., Wheeler H.A.* Wide Angle Impedance Matching of a Planar Array Antenna by a Dielectric Sheet // *IEEE Trans, on Antennas and Propagation.* – 1966. – Vol. AP-14, No. 1. – P.49-53.
21. *Сурков В.И.* Влияние согласующих штырей на параметры вибраторных ФАР // *Труды МЭИ.* – М.: Изд-во МЭИ, 1981. – Вып. 553. – С. 40-44.

REFERENCES

1. *Khansen R.S.* Fazirovannye antennye reshetki. Ser. «Mir radioelektroniki» [Phased array systems. Series "World of electronics"]: translation from English R. J. A.I. Sinani. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 560 p.
2. *Mailloux R. J.* Phased Array Antenna Handbook. Boston: Artech House, 1994.
3. *Habashi A., Nourinia J., Ghobadi C.* Mutual coupling reduction between very closely spaced patch antennas using low-profile folded split-ring resonators, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, Vol. 10, pp. 862-865.
4. *Farsi, S., H. Aliakbarian, B. Nauwelaers, G. A. E. Vandebosch.* Mutual coupling reduction between planar antenna by using a simple microstrip U-section, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, Vol. 11, No. 9, pp. 1501-1503.
5. *Sazonov D.M.* Mnogoelementnye antennye sistemy. Matrichnyy podkhod [Multiple antenna system. The matrix approach]. Moscow: Radiotekhnika, 2015, 143 p.
6. *Amitey N., Galindo V., Vu Ch.* Teoriya i analiz fazirovannykh antennykh reshetok [Theory and analysis of phased array]. Moscow: Mir, 1974, 458 p.
7. *Voskresenskiy D.I., Stepanenko V.I., Filippov V.S. i dr.* Ustroystva SVCh i antenny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok. Uchebnoe posobie dlya vuzov [Microwave device and antenna. Design of phased antenna arrays. Textbook for high schools / under the editorship D. I. Voskresenskiy], ed by. D.I. Voskresenskogo. Moscow: Radiotekhnika, 2003, 632 p.

8. *Kasyanov A.O., Obukhovets V.A.* Blindness Angles in Microstrip Phased Arrays Patterns, 2000 *International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2000). Conference Proc.* Kharkov, Ukrain, Sept. 12-15. 2000, pp. 280-282.
9. *Obukhovets V.A., Kas'yanov A.O.* Mikropoloskovye otrazhatel'nye antennye reshetki. Metody proektirovaniya i chislennoe modelirovanie [Reflective microstrip antenna arrays. Design methods and numerical modeling]. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 240 p.
10. *Bankov S.E., Guttsayt E.M., Kurushin A.A.* Reshenie opticheskikh i SVCh zadach s pomoshch'yu HFSS [The solution of optical and microwave tasks using HFSS]. Moscow: Orkada, 2012, 240 p.
11. *Ben A. Munk.* Finite Antenna Arrays and FSS. John Wiley & Sons, Inc. 2003, 357 p.
12. *Vendik O.G., Kozlov D.S.* A Novel Method for the Mutual Coupling Calculation Between Antenna Array Radiators, *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2015, No. 12, pp. 16-21.
13. *Ghosh, C. K., S.K. Parui.* Elimination of scan blindness of microstrip array by using I-shaped $\lambda/2$ resonator, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, Vol. 56, No. 2, pp. 334-337.
14. *Manuilov M.B., Sinyavskiy G.P.* Volnovodnye antennye reshetki s mnogosloynnymi konechnymi dielektricheskimi pokrytiyami [Waveguide antenna arrays with multilayer dielectric coatings end], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2010, No. 2, pp. 33-41.
15. *Isaa M.S.M., Langleyb R.J., Khamasb S., Isaa A.A.M., Zina M.S.I.M., Zakariaa Z., Harona N.Z., Ahmadv A.* A Technique of Scan Blindness Elimination for Planar Phased Array Antenna using Miniaturized EBG. 69:2 (2014) 11–15 (www.jurnalteknologi.utm.my) eISSN 2180–3722.
16. *Donzelli G., Capolino F., Boscolo S., Midrio M.* Elimination of Scan Blindness in Phased Array Antennas Using a Grounded-Dielectric EBG Material, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, Vol. 6, pp. 106-108.
17. *Nikolic, M. M., A. Djordjevic, A. Nehorai.* Microstrip antennas with suppressed radiation in horizontal directions and reduced coupling, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2005, Vol. 53, No. 11, pp. 3469-3476.
18. *Voskresenskiy D.I. i dr.* Avtomatizirovannoe proektirovanie antenn i ustroystv SVCh [Computer-aided design of antennas and microwave devices]. Moscow: Radio i svyaz', 1988.
19. *Eom AS.-Y., Park H.-K., Jeon S.-J.* Shaping of flat-topped element patterns in a planar array of circular waveguides using a multilayered disk structure. Part II: Experimental study and comparison, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 200, Vol. 51, No. 5, pp. 1048-1053.
20. *McGill E.G., Wheeler H.A.* Wide Angle Impedance Matching of a Planar Array Antenna by a Dielectric Sheet, *IEEE Trans, on Antennas and Propagation*, 1966, Vol. AP-14, No. 1, P.49-53.
21. *Surkov V.I.* Vliyaniye soglasuyushchikh shtyrey na parametry vibratornykh FAR [The effect of the matching pins on the parameters of vibratory HEADLIGHTS], *Trudy MEI* [Proceedings of MEI]. Moscow: Izd-vo MEI, 1981, Issue 553, pp. 40-44.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Х.Ш. Кульбикаян.

Обуховец Виктор Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vao@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634322626; кафедра антенн и радиопередающих устройств; д.т.н.; профессор.

Obukhovets Victor Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: vao@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634322626; the department of antennas and radio transmitters; dr. of eng. sc.; professor.