

УДК 621.396.67

## **СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ВСЕНАПРАВЛЕННАЯ В МАГНИТНОЙ ПЛОСКОСТИ ЛИНЕЙНАЯ РЕШЕТКА ПЕЧАТНЫХ ДИПОЛЕЙ**

**В. А. Калошин<sup>1,2</sup>, К. З. Нгуен<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет),  
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.

**Аннотация.** Предположена и исследована линейная сверхширокополосная всенаправленная в магнитной плоскости печатная антенная решетка. Антенная решетка содержит четное число печатных диполей, запитываемых через синфазный делитель мощности на основе симметричной двухпроводной линии в форме меандра. С использованием метода конечных элементов проведено численное моделирование и оптимизация параметров двухэлементной и четырехэлементной антенных решеток. Исследование характеристик согласования и излучения оптимизированных решеток показало, что двухэлементная решетка в полосе частот 70% имеет неравномерность диаграммы направленности в магнитной плоскости менее 1.5 дБ, усиление 2.3 - 5 дБ, а четырехэлементная имеет в полосе частот 60% неравномерность – менее 1 дБ, а коэффициент усиления – 5 - 8 дБ. Измерения экспериментального образца двухэлементной решетки подтвердило результаты численного моделирования.

**Ключевые слова:** СШП антенна, всенаправленная в магнитной плоскости антенна, печатный диполь, линейная антенная решетка.

**Abstract.** UWB omnidirectional in magnetic plane printed linear antenna array is proposed and investigated. The array has even number of printed dipoles that are fed via an in phased power divider on the base symmetric two-strip line in a meander form. The two-element and four-element antenna arrays are simulated and optimized

using the finite element method. The study of the matching and radiation characteristics of optimized arrays shows that the two-element array has the matching bandwidth 70% and 2.3 – 5 dB gain with variation less than 1.5 dB in H-plane, and the four-element antenna array has the matching bandwidth more than 60% and 5 – 8 dB gain with variation less than 1 dB in H-plane. The two-element array sample is fabricated and measured. There is a good agreement between simulated and measured results.

**Key words:** UWB antenna, omnidirectional in magnetic plane antenna, printed dipole, linear antenna array.

## Введение

К настоящему времени для формирования в сверхширокой полосе частот всенаправленной в магнитной (H) плоскости диаграммы направленности широко используются печатные диполи и монополи [1 - 6]. Исследованный в работе [1] СШП монополь имеет высокий коэффициент усиления (до 5.85 дБ на верхних частотах) и полосу рабочих частот более 138%, но большую неравномерность диаграммы направленности в H – плоскости (более 4 дБ на высоких частотах). В работах [2, 3] исследованы СШП печатные монополи, которые согласованы в полосе более 95%, но имеют низкий коэффициент усиления (менее 3 дБ) с неравномерностью в H плоскости менее 2 дБ. Также низкий коэффициент усиления (менее 2.2 дБ) имеет печатный СШП диполь [4], согласованный в полосе частот 47% с очень большой неравномерностью диаграммы направленности в H – плоскости (более 10 дБ на высоких частотах). Более широкую полосу согласования (более 100%) и больший коэффициент усиления (КУ) (2.2 – 3.8 дБ) с неравномерностью до 5дБ в H плоскости имеет печатный диполь в [5]. Печатный диполь с пассивными элементами, исследованный в работе [6] имеет неравномерность диаграммы направленности в H – плоскости менее 2.2 дБ, полосу согласования более 90% и коэффициент усиления 1.9 – 3.4 дБ.

Отметим, что чем больше коэффициент усиления, тем, как правило, выше уровень неравномерности диаграммы направленности излучателей в Н плоскости, особенно на высоких частотах.

В связи с низкими значениями коэффициентов усиления печатных диполей и монополей с малой неравномерностью усиления в Н плоскости ряд работ посвящен исследованию возможности создания всенаправленных в Н-плоскости печатных решеток [7 - 11]. Исследованная в [7] решетка имеет высокий КУ 5 – 6 дБ, довольно низкий уровень неравномерности усиления в Н-плоскости (2дБ), но согласована в узкой полосе частот 2.385 – 2.52 ГГц (5.5%). Решетка в работе [8] согласована в полосе частот 5.07 – 6.16 ГГц (20%), имеет стабильный КУ (4.5 дБ) и уровень неравномерности усиления в Н – плоскости менее 2.0 дБ. Меньший уровень неравномерности усиления в Н- плоскости (менее 1.5 дБ) получен в работе [9]. Решетка работает в двух диапазонах (0.8 – 0.93 ГГц и 1.7 – 2.05 ГГц) и обеспечивает в полосе рабочих частот КУ 3.5 – 5.5 дБ. Высокий коэффициент усиления (до 10 дБ) и небольшую неравномерность диаграмм в Н – плоскости (0.5 дБ) имеет линейная антенная решетка щелевых излучателей [10], но в узкой полосе частот (4.6%). СШП решетка [11], согласованная в полосе частот 58% имеет КУ 3 – 5дБ, но большую неравномерность усиления в Н плоскости (до 3.5 дБ).

Таким образом, у печатных решеток, также как и у печатных элементов, чем больше коэффициент усиления, тем, как правило, меньше полоса рабочих частот и больше неравномерность диаграммы направленности в Н- плоскости.

Целью данной работы является моделирование, исследование характеристик согласования и излучения антенных решеток, а также оптимизация их параметров как для обеспечения сверхширокой полосы согласования, так и высокой величины КУ при сохранении минимальной неравномерности усиления в Н- плоскости.

## **1. Оптимизация параметров элементов решетки**

Неравномерность усиления в Н-плоскости решеток печатных элементов определяется, с одной стороны, неравномерностью диаграммы направленности

печатного элемента в этой плоскости, а с другой стороны, влиянием делителя мощности. Как показал анализ характеристик печатных диполей и монополей, ширина полосы согласования растет с увеличением ширины излучателя, а неравномерность усиления в Н-плоскости, наоборот, при этом увеличивается. Из результатов приведенного выше обзора видно, что достаточно широкой полосой и сравнительно малой неравномерностью усиления в Н плоскости обладают печатные диполи и монополи, исследованные в [2, 3]. Сравним частотные зависимости коэффициента отражения и диаграммы направленности в Н – плоскости монополя [3] (рис. 1а) и диполя в виде двух половинок такого монополя (рис.1б)

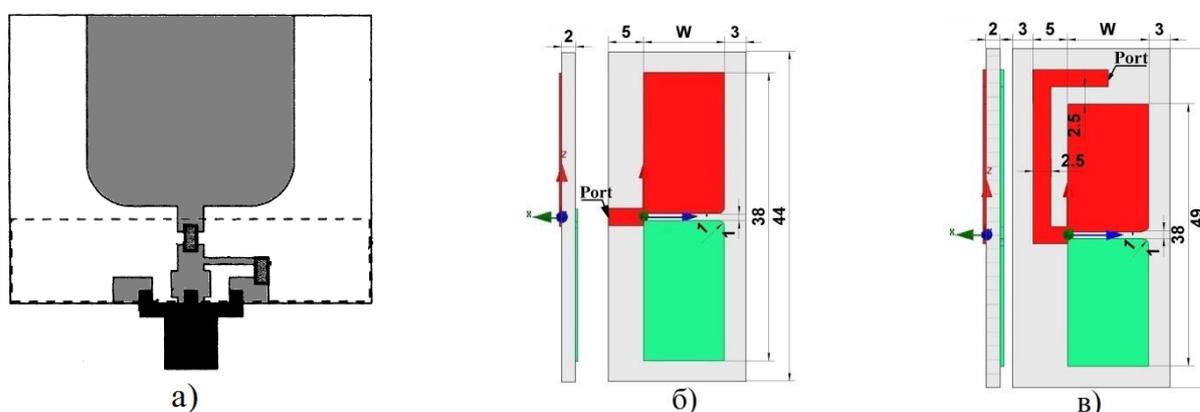


Рис. 1. Монополь [3] (а), диполь (б), диполь с линией питания (в)

На рис. 2 сплошной линией показан результат моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ) зависимости коэффициента отражения от частоты печатного монополя, а штриховой – диполя. На рис. 2 видно что полоса частот диполя меньше, чем у монополя. Для расширения полосы частот диполя используем в качестве дополнительного параметра оптимизации связь между диполем и полосковой линии питания (см. рис. 1в). Результат расчета зависимости коэффициента отражения от частоты оптимального 100-омного диполя с линией питания показан на рис. 2 штрих - пунктирной линией. На рисунке видно, что полоса согласования оптимального диполя с линией питания расширяется, что можно объяснить появлением в частотной характеристике излучателя второго резонанса из-за электродинамической связи диполя и линии.

На рис. 3 сплошной линией показаны результаты расчета диаграммы направленности в магнитной плоскости монополя [3] на частоте 4 ГГц при  $\theta = 90^\circ$ , штриховой – диполя, а штрих - пунктирной – оптимального 100-омного диполя с линией питания. На рис. 3 видно, что, кроме разницы усиления в плоскости печатной платы и в ортогональной плоскости, появляется несимметрия диаграммы направленности в плоскости, ортогональной плоскости печатной платы. Борьба с этой несимметрией будет вестись ниже.

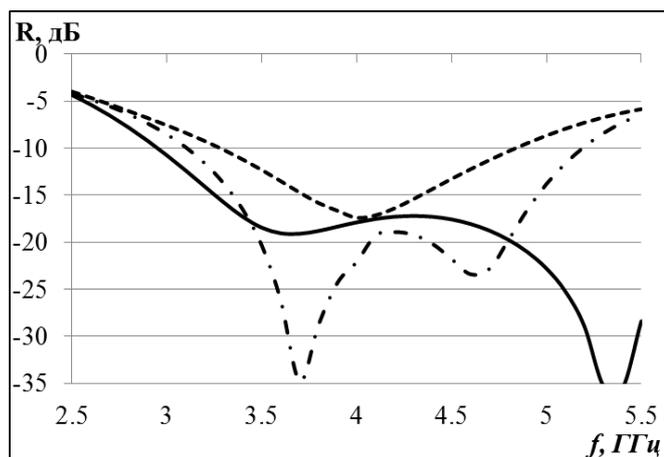


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от частоты

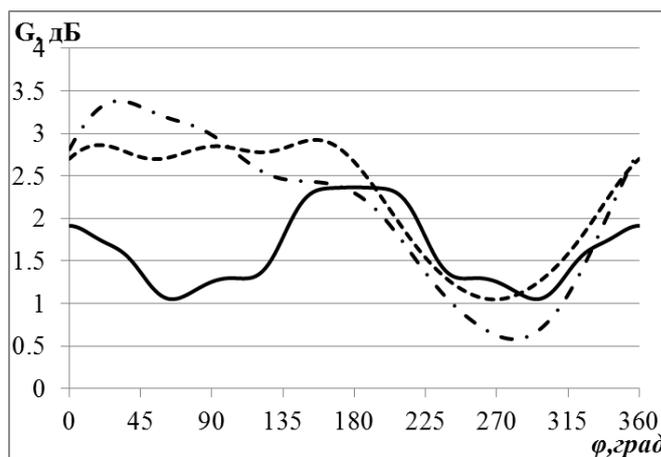


Рис. 3. Диаграммы направленности в магнитной плоскости на частоте 4 ГГц при  $\theta = 90^\circ$

## 2. Линейные решетки печатных диполей

Перейдем к борьбе с неравномерностью усиления в Н- плоскости. Основная идея – использование линейной антенной решетки с антисимметричным расположением печатных элементов и линии питания (рис. 4а). С использованием МКЭ была построена электродинамическая модель решетки двух печатных диполей и проведена оптимизация их параметров с целью обеспечения сверхширокополосного согласования и минимальной неравномерности диаграммы направленности в Н – плоскости. Полученные в результате оптимальные геометрические размеры этой решетки показаны на рис. 4а (в миллиметрах), на рис. 4б показан экспериментальный образец решетки. Диполи расположены на двух сторонах подложки из Arlon AD255 толщиной 2 мм, диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2.55$  и тангенсом угла

потерь  $\text{tg}\delta = 0.018$ , толщина металлической фольги – 18 мкм. Входы диполей соединены с выходами делителя мощности на основе симметричной двухпроводной линии в форме меандра, вход которого расположен в центре решетки и соединен с 50-омной коаксиальной линией.

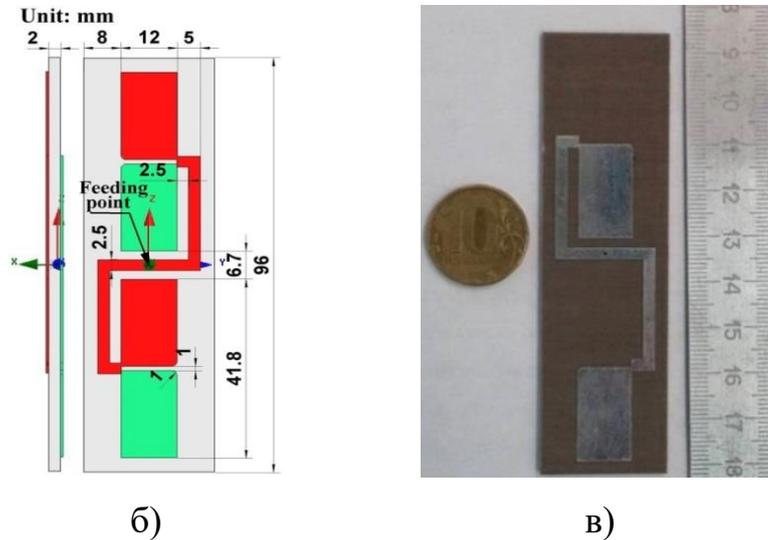


Рис. 4. Двухэлементная решетка (а), ее фотография экспериментального образца (б)

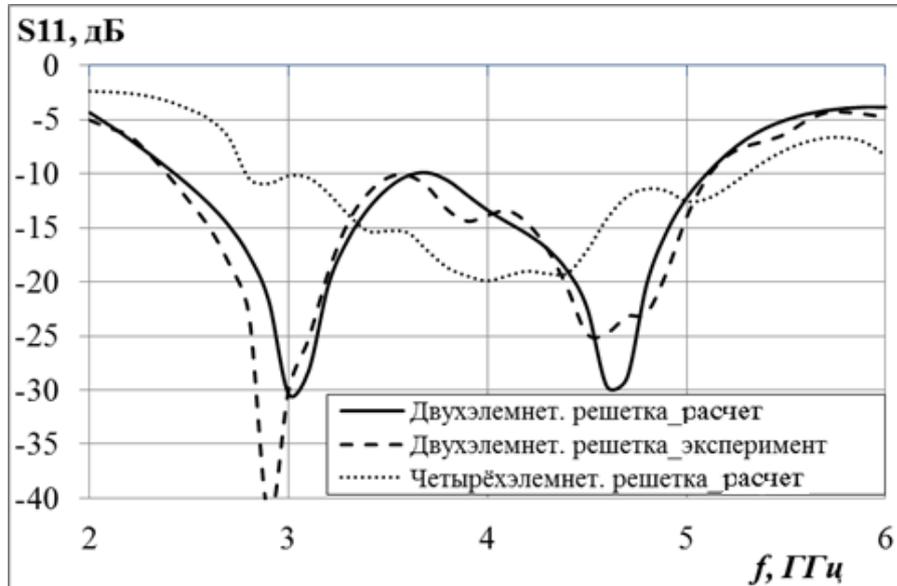


Рис. 5. Зависимости коэффициентов отражения антенных решеток от частоты

Результаты численного моделирования зависимости коэффициента отражения от частоты приведены на рис. 5 сплошной линией для двухэлементной решетки и пунктирной - для четырехэлементной решетки. Штриховой линией на рисунке показаны результаты измерения коэффициента

отражения экспериментального образца. Видно, что двухэлементная решетка согласована в полосе частот 2.4 – 5.1 ГГц (72%), а четырехэлементная решетка - в полосе 2.8 – 5.3 ГГц (62%).

На рис. 6 сплошной и пунктирной линиями показаны расчетные частотные зависимости, соответственно, максимального и минимального в Н – плоскости коэффициента усиления двухэлементной решетки; штриховой и штрих - пунктирной – результаты измерений соответствующих характеристик экспериментального образца, длиной штриховой и длиной штрих - пунктирной - расчетные частотные зависимости, соответственно, максимального и минимального в Н – плоскости коэффициента усиления четырехэлементной решетки. Видно, что в полосе согласования (2.45 – 5.1 ГГц) двухэлементная решетка имеет коэффициент усиления 2.3 - 5 дБ и неравномерность диаграммы направленности в Н – плоскости менее 1.5 дБ, а четырехэлементная решетка в полосе частот 2.85 - 5.2 ГГц имеет коэффициент усиления 5 – 8 дБ, а неравномерность диаграммы направленности в Н – плоскости - менее 1 дБ.

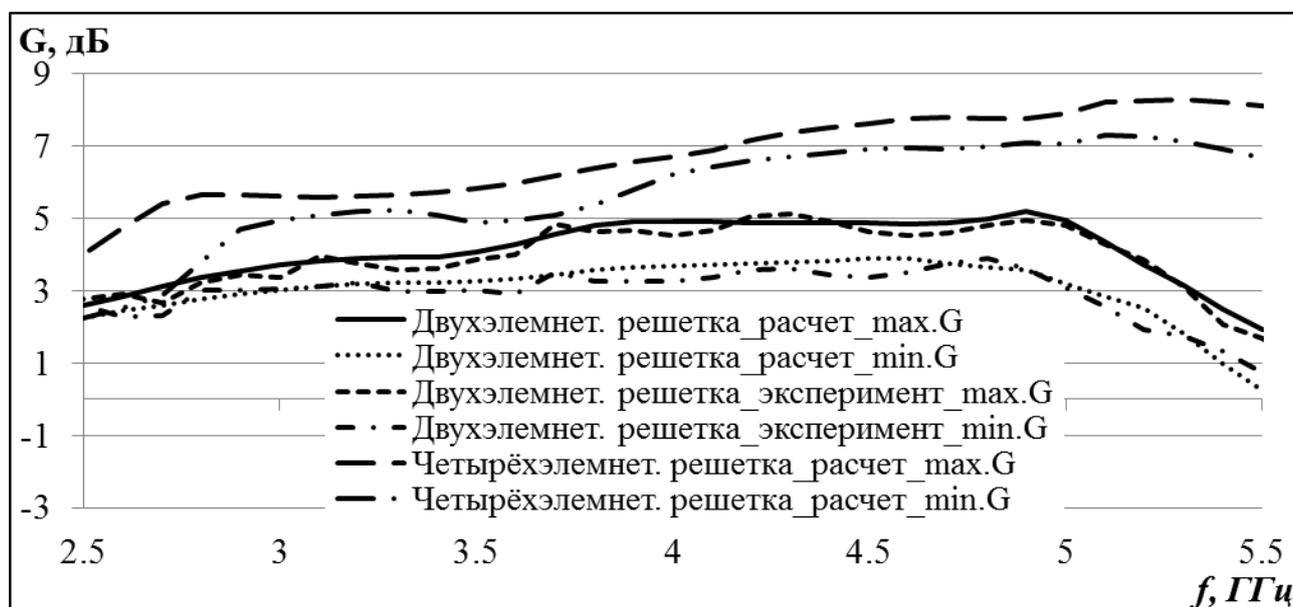


Рис. 6. Зависимости коэффициентов усиления антенных решеток от частоты

Следует отметить, что неравномерность диаграммы направленности решетки двух печатных диполей на 0.5 дБ больше, чем у решетки четырех диполей, но существенно меньше, чем у одного 100-омного элемента (рис.3).

Таким образом, за счет антисимметричного расположения элементов и питающей линии неравномерность усиления элементов решетки в Н плоскости в диаграмме направленности решетки в значительной степени компенсируется.

### **Заключение**

В данной работе предложен и исследован новый тип СШП печатных антенных решеток. Оптимизированная решетка двух печатных диполей в 70% полосе частот имеет коэффициент усиления 2.3 - 5 дБ с неравномерностью в магнитной плоскости менее 1.5 дБ, а четырехэлементная решетка имеет в 60% полосе частот коэффициент усиления 5 – 8 дБ с неравномерностью в магнитной плоскости менее 1 дБ. Таким образом, результаты исследования СШП линейных антенных решеток двух и четырех двухслойных печатных диполей подтверждают возможность уменьшения неравномерности усиления печатных решеток в магнитной плоскости в сверхширокой полосе частот при использовании антисимметричного расположения элементов решетки и линии питания. Эта идея может быть использована при синтезе СШП печатных всенаправленных в магнитной плоскости решеток с большим числом элементов в случае необходимости увеличения коэффициента усиления.

### **Литература**

1. Reza Zaker, A. Abdipour. A very compact ultrawideband printed omnidirectional monopole antenna // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 2010. vol. 9. pp. 471 - 473
2. F. Fereidoony, S. Chamaani, S.A. Mirtaheri. Systematic design of UWB monopole antennas with stable omnidirectional radiation pattern // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 2012. vol. 11, pp. 752 - 755
3. Do-Hoon Kwon, Yongjin Kim, N.P. Chubinsky. A printed dipole UWB antenna with GPS frequency notch function // 2005 IEEE Antennas Propag. Society International Symposium. 3 – 8 July 2005. pp. 520 - 523
4. W. S. Yeoh, K. L. Wong. Wideband miniaturized half bowtie printed dipole antenna with integrated balun for wireless applications // IEEE Trans. Antennas

Propag., 2010.vol. 59, no 1, pp. 339 - 342

5. E. Gueguen, F. Thudor; P. Chambelin. A low cost UWB printed dipole antenna with high performance // 2005 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, 5-8 Sept. 2005, pp. 89 - 92.

6. Z. Y. Zhang, X. Yang, S. L. Zuo, G. Fu. Wideband omnidirectional printed dipole antenna with dumbbell-shaped open sleeve for wireless communication applications // IET Microw. Antennas Propag., 2014. vol. 8, no. 15, pp.1299 – 1304

7. Wong K. L., Hsiao F. R., Chiou T. W. Omnidirectional planar dipole array antenna // IEEE Trans. Antennas Propag. 2004. Vol. 52. No. 2. pp. 624 - 628

8. Hsiao F., Wong K. Omnidirectional planar folded dipole antenna // IEEE Trans. Antennas Propag. 2004. Vol. 52. No. 7. pp. 1898 - 1902

9. Wei K., Zhang Z., Chen W., Feng Z., Iskander M. F. A triband shunt-fed omnidirectional planar dipole array // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2010. Vol. 9. pp. 850 - 853

10. Chen X., Huang K., Xu X. A novel planar slot array antenna with omnidirectional pattern // IEEE Trans. Antennas Propag. 2011. Vol. 59. No. 12. pp. 4853 – 4857

11. Yu Y., Xiong J., Wang R. A wideband omnidirectional antenna array with low gain variation // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2016. Vol. 15. pp. 386 – 389

**Ссылка на статью:**

В. А. Калошин, К. З. Нгуен. Сверхширокополосная всенаправленная в магнитной плоскости линейная решетка печатных диполей. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/13/text.pdf>