

УДК 621.396.679

Низкопрофильная широкополосная антенная система с улучшенной формой диаграммы направленности на основе искусственного магнитного проводника конечного размера

Измайлов А.А.*, Волков А.П.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: yustas1993@yandex.ru*

***e-mail: alexander.p.volkov@gmail.com*

Аннотация

Представлено техническое решение широкополосной низкопрофильной антенной системы на основе искусственного магнитного проводника (АМС). В качестве базового элемента АМС структуры выбран печатный прямоугольный элемент. Для улучшения направленных свойств антенной системы использована система из «сдвоенного» излучателя. Разработанная антенная система имеет высоту профиля 14 мм ($0.093\lambda_0$), КСВ < 2 и КУ > 10.0 дБ при рабочей полосе частот 40%. Проведено сравнение разработанной антенной системы с традиционным случаем расположения вибраторного излучателя на АМС структуре.

Ключевые слова: широкополосная антенна, низкопрофильная антенна, искусственный магнитный проводник, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

Введение

Основным типом антенных устройств для перспективных авиационных и космических радиолокационных комплексов различного назначения являются АФАР с широкой полосой рабочих частот, состоящие из системы излучателей, в частности вибраторов, расположенных над металлическим экраном. Как в авиационных, так и в космических комплексах одним из важных параметров является высота профиля антенны. В авиационных комплексах это важно для сохранения аэродинамики носителя, в космических комплексах – для компактного размещения антенного устройства внутри обтекателя при выводе космического аппарата на орбиту [1, 2].

Перспективным методом снижения высоты профиля антенн, получившим широкое развитие в последние два десятилетия, является использование периодических СВЧ композитных структур со свойствами искусственного магнитного проводника (artificial magnetic conductor – AMC) [3]. AMC структуры функционируют в квазистатической области (длина волны больше периода структуры) и характеризуется некоторыми эквивалентными электрофизическими параметрами, получаемыми в квазистатическом приближении. Касательная компонента магнитного поля на AMC структуре равна нулю, а коэффициент отражения от нее равен +1 [4].

AMC структуры впервые предложены D.F. Sievenpiper в статье «High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band» [5] в 1999 году и с тех пор являлись объектом исследований многих научных коллективов. В работах

[6-10] предложены реализации низкопрофильных антенных систем на основе АМС структур с рабочей полосой 5-30%. Использование АМС структур в качестве подложки позволяет разместить горизонтальный диполь вблизи подобной структуры, при входном сопротивлении 50 Ом в широкой полосе частот. Однако, помимо характеристик согласования антенны с фидером, необходимо обеспечить требуемые свойства направленности антенной системы [11]. В [12] показано, что в широкой полосе рабочих частот излучателя на основе АМС структуры происходит ухудшение его направленных свойств и образование провала в нормальном направлении ДН излучателя.

Из литературы можно выделить следующие способы улучшения характеристик направленности излучателя расположенного над АМС структурой конечного размера:

- 1) Контроль размера АМС структуры в **H**-плоскости антенны [13, 14]. Полоса частот ограничена 30-36%, и требуется диэлектрическая подложка с высоким значением диэлектрической проницаемости, что приводит к увеличению веса антенны (особенно в ОВЧ и УВЧ диапазонах). Отметим, что способ уменьшения числа ячеек АМС в **H**-плоскости излучателя не может быть использован при разработки двухполяризационных АС.
- 2) Увеличение расстояния от излучателя до АМС подложки позволяет уменьшить связь между АМС структурой и излучателем и, тем самым, улучшить характеристики направленности антенны [15, 16]. При этом происходит увеличение полной высоты профиля на $0.05-0.1\lambda_0$.

- 3) Введение проводящих полос на краю АМС структуры для улучшения направленных свойств антенны предложено в [17]. Указанный способ не подходит для разработки двухполяризационных антенн.
- 4) Несимметричное расположение излучателя относительно центра [18] АМС структуры позволяет уменьшить негативное влияние ТЕ волны на ДН, однако приводит к смещению максимума ДН на 15-20 градусов относительно нормали.

В работе [19] разработан метод устранения провала в ДН АС расположенной на планарной АМС структуре, путем использования системы из «сдвоенного» излучателя, состоящего из двух вибраторов, запитываемых синфазно и разнесенных на расстояние $D \approx \lambda_{\pi} / 2$ в плоскости провала.

Анализ АМС структур конечных размеров

На первом этапе анализа структуру со свойствами искусственного магнитного проводника можно рассматривать как эффективную среду с поверхностным импедансом, определяемым сосредоточенными параметрами, зависящими от геометрии структуры. Указанный подход позволяет на предварительном этапе рассматривать структуру, как параллельный контур, а поверхностный импеданс Z_s представить в виде [4, 5, 13, 20]:

$$Z_s = \frac{i\omega L}{1 - \omega^2 LC}, \quad (1)$$

где ёмкость C определяется между торцами соседних электрических пластин и перекрывающейся части параллельных пластин, а индуктивность L – длиной пути тока внутри ячейки. Фаза коэффициента отражения для искусственной магнитной

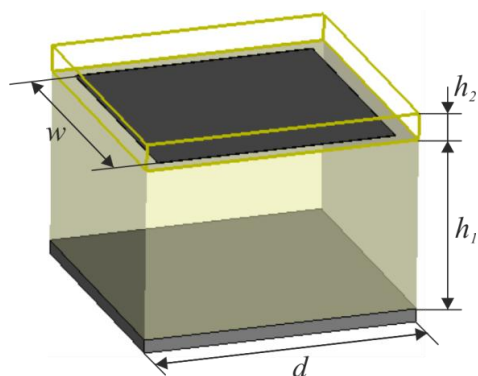
структуры в случае нормального падения плоской электромагнитной волны определяется по формуле $\Phi = \text{Im}\{\ln[(Z_s - \eta)/(Z_s + \eta)]\}$, где $\eta = 120\pi$, а Z_s определяется по формуле (1).

Резонансная частота определяется выражением $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ и соответствует равенству нулю фазы коэффициента отражения $\Phi(f) = 0$. Рабочая полоса АМС структуры соответствует изменению фазы от $\pi/2$ до от $-\pi/2$ и оценивается по формуле [13, 20]:

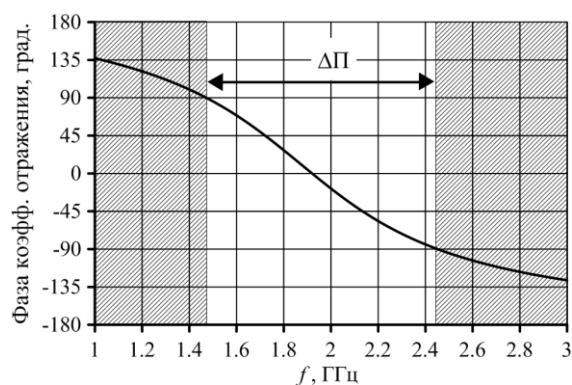
$$\Delta\Pi = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\sqrt{L/C}}{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}} = \frac{2\pi}{\lambda_0} h, \quad (2)$$

при этом предполагается, что толщина структуры $h \ll \lambda_0$, где λ_0 – длина волны в свободном пространстве на резонансной частоте.

На рис. 1 приведена зависимость фазы коэффициента отражения от частоты для АМС структуры на основе прямоугольного печатного элемента с параметрами: период АМС $d = 20.59$ мм, ширина проводящего патча $w = 18$ мм, расположенного на диэлектрической подложке толщиной $h_2 = 1$ мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.3$ (FR-4). Толщина диэлектрического основания $h_1 = 13$ мм с $\epsilon \sim 1$. Рабочая полоса АМС структуры в виде печатного прямоугольного элемента составляет 46%.



а)



б)

Рис.1. Единичная ячейка АМС структуры на основе печатного прямоугольного элемента: а) – общий вид; б) – фаза коэффициента отражения.

В [12] показано, что образование провала в **H**-плоскости ДН излучателя обусловлено равенством длины конечной АМС структуры и резонансной длины волны **TE** моды, распространяющейся вдоль АМС. Рассматривая искусственную магнитную структуру конечного размера как резонатор, можно записать условия резонанса **TE** волны [12]:

$$\beta_{TE} l_{AMC} = p\pi, p = 1, 2, \quad (3)$$

где β_{TE} – постоянная распространения моды TE_1 , $l_{AMC} = d \cdot N_{AMC}$ – длина АМС структуры в **H**-плоскости излучателя, d – период АМС структуры. На рис. 2 приведено графическое решение уравнения (3), определяемое пересечением дисперсионной кривой моды TE_1 , и вертикальной линией, определяемой выражением(1), при $N_{AMC} = 9$. Видно, что условие резонанса выполняется на частоте 2.05 ГГц. Следовательно, согласно [12], ухудшение ДН излучателя на АМС структуре, размером 9×9 ячеек, будет наблюдаться на частотах выше 2.05 ГГц.

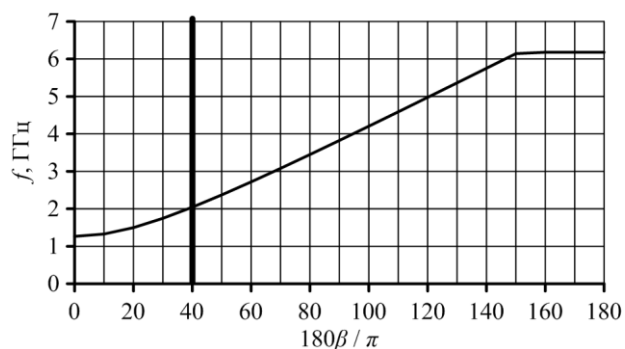


Рис. 2. К определению резонанса в конечной АМС структуре.

Низкопрофильный одиночный излучатель на основе искусственного магнитного проводника

На рис. 3 приведен общий вид одиночного вибраторного излучателя на АМС структуре в виде печатного прямоугольного элемента. Параметры излучателя: длина $l_d = 45.1$ мм, ширина $dw_1 = dw_2 = 2.64$ мм. Питание осуществляется непосредственно коаксиальным кабелем. Параметры АМС структуры: $d = 19.99$ мм, $h_1 = 13$ мм, $\epsilon_1 = 1.0$, период АМС структуры $d = 20.59$ мм, $w = 18$ мм, толщина печатной платы $h_2 = 1$ мм, $\epsilon_2 = 4.3$. Число ячеек структуры $N_{АМС} \times N_{АМС} = 9 \times 9$, $L = 200$ мм.

На рис.4а) приведена зависимость КСВ от частоты. Рабочая полоса структуры по уровню КСВ < 2 составляет 35%. На рис. 4б) приведена зависимость КУ в нормальном направлении ($D(\theta = 0^\circ)$) от частоты. В соответствии с рис. 2 происходит падение КУ, начиная с частоты $f = 2.05$ ГГц.

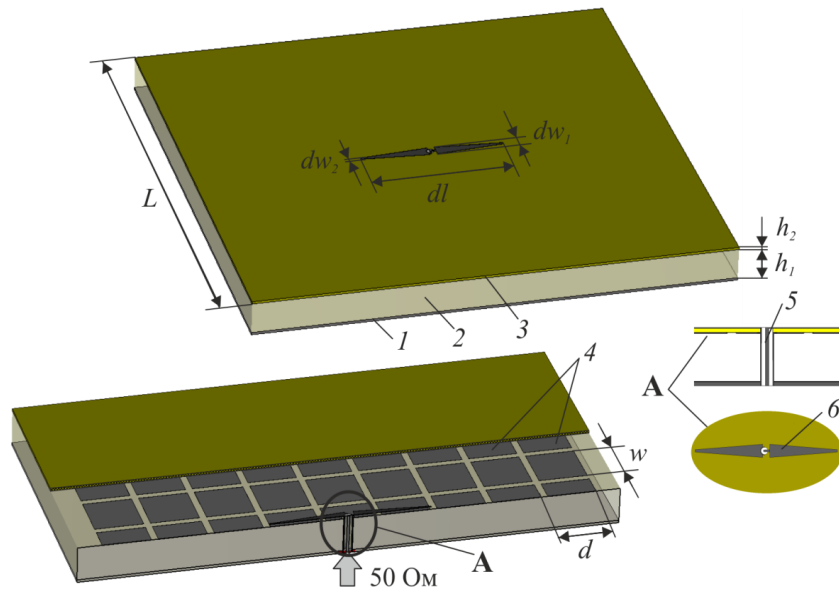
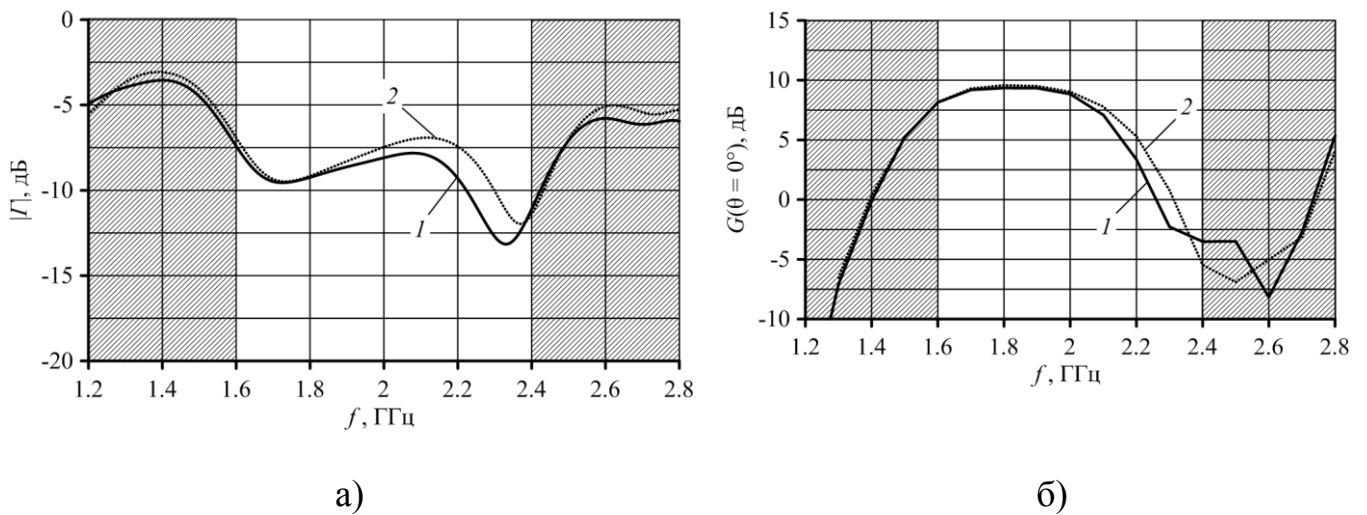


Рис. 3. Низкопрофильный одиночный излучатель на основе искусственного магнитного проводника. 1 – проводящий экран; 2 – диэлектрическое основание с ϵ_1 ; 3 – печатная плата с ϵ_2 ; 4 – печатные прямоугольные элементы; 5 – коаксиальный кабель; 6 – вибраторный излучатель.



1 – метод КРВО; 2 – метод КЭ.

Рис. 4. Низкопрофильный одиночный излучатель на основе искусственного магнитного проводника: а) – коэффициент отражения от входа излучателя; б) – КУ.

Низкопрофильный «сдвоенный» излучатель на основе искусственного магнитного проводника

В соответствии с методом, предложенным в [19], для улучшения характеристик направленности излучателя расположенного над АМС структурой конечного размера использован «сдвоенный», состоящий из двух вибраторов, запитываемых синфазно и разнесенных на расстояние $D \approx \lambda_{\text{п}} / 2$ в плоскости провала (рис. 5). Параметры «сдвоенного» излучателя: длина $l_d = 57.93$ мм, ширина $dw_1 = 1.11$ мм, $dw_2 = 6.43$ мм, расстояние между излучателями $D = 61.77$ мм (было подстроено при оптимизации АС). Для питания «сдвоенного излучателя используется делитель мощности Вилкинсона [21]. Параметры АМС структуры: $d = 20.59$ мм, $h_1 = 13$ мм, $\epsilon_1 = 1.0$, период АМС структуры $d = 20.59$ мм, $w = 18$ мм, толщина печатной платы $h_2 = 1$ мм, $\epsilon_2 = 4.3$. Число ячеек структуры $N_{\text{АМС}} \times N_{\text{АМС}} = 9 \times 9$, $L = 200$ мм.

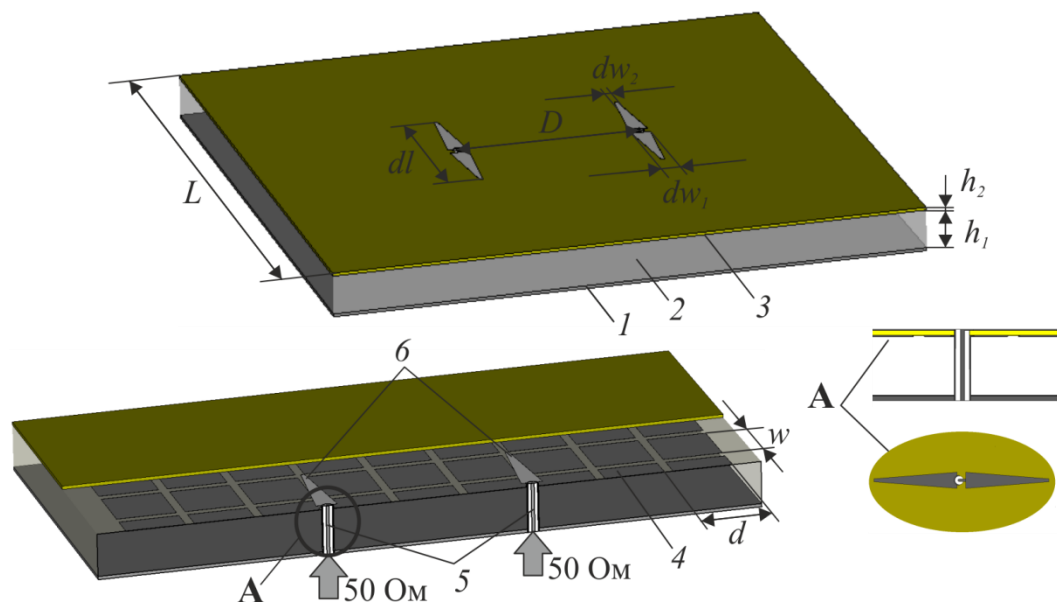
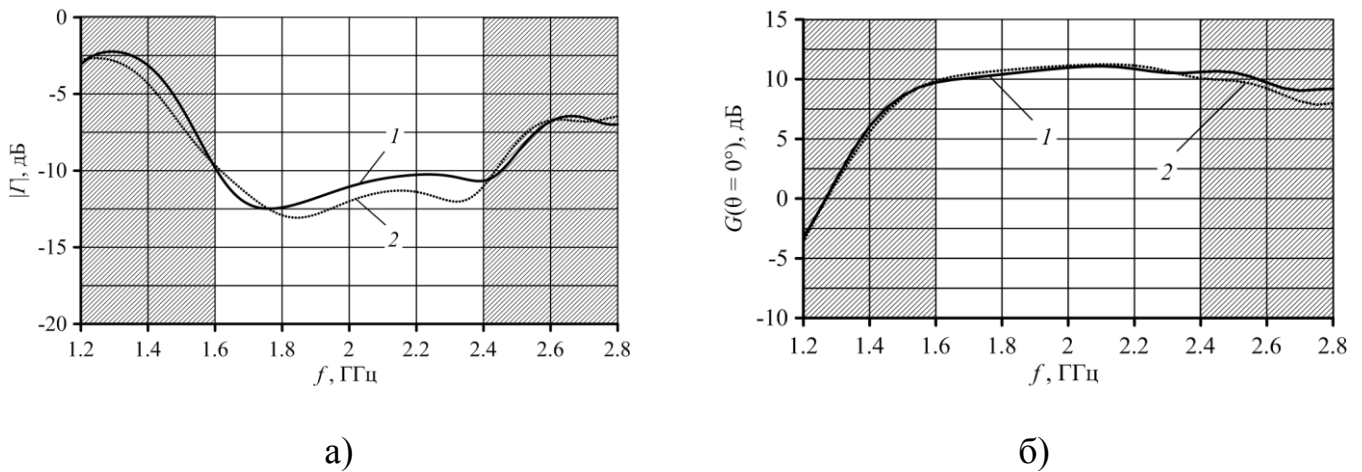


Рис. 5. Низкопрофильный одиночный излучатель на основе искусственного магнитного проводника. 1 – проводящий экран; 2 – диэлектрическое основание с ϵ_1 ;

3 – печатная плата с ϵ_2 ; 4 – печатные прямоугольные элементы; 5 – коаксиальный кабель; 6 – вибраторный излучатель.

На рис. 6 а) приведена зависимость коэффициента отражения $|\Gamma|$ от входа излучателя от частоты. Рабочая полоса структуры по уровню КСВ <2 ($|\Gamma| < -10$ дБ) составляет 40%. На рис. 6 б) приведена зависимость КУ в нормальном направлении ($G(\theta = 0^\circ)$) от частоты. Использование «сдвоенного» излучателя позволило устранить провал в ДН АС и обеспечить $KУ > 10$ дБ в рабочей полосе частот.



1 – метод КРВО; 2 – метод КЭ.

Рис. 6. Низкопрофильный «сдвоенный» излучатель на основе искусственного магнитного проводника: а) – коэффициент отражения от входа излучателя; б) – КУ.

На рис. 7 приведено распределение вектора напряженности электрического поля в **H**-плоскости одиночного излучателя (рис. 7а) и «сдвоенного» излучателя (рис. 7б) на частоте $f = 2.4$ ГГц. При использовании одиночного излучателя происходит возбуждение ТЕ-волны и амплитуда поля на краях структуры значительна и составляет 43 дБ. Использование «сдвоенного» излучателя позволяет устранить ТЕ-волну и снизить амплитуду поля на краях АМС структуры [21].

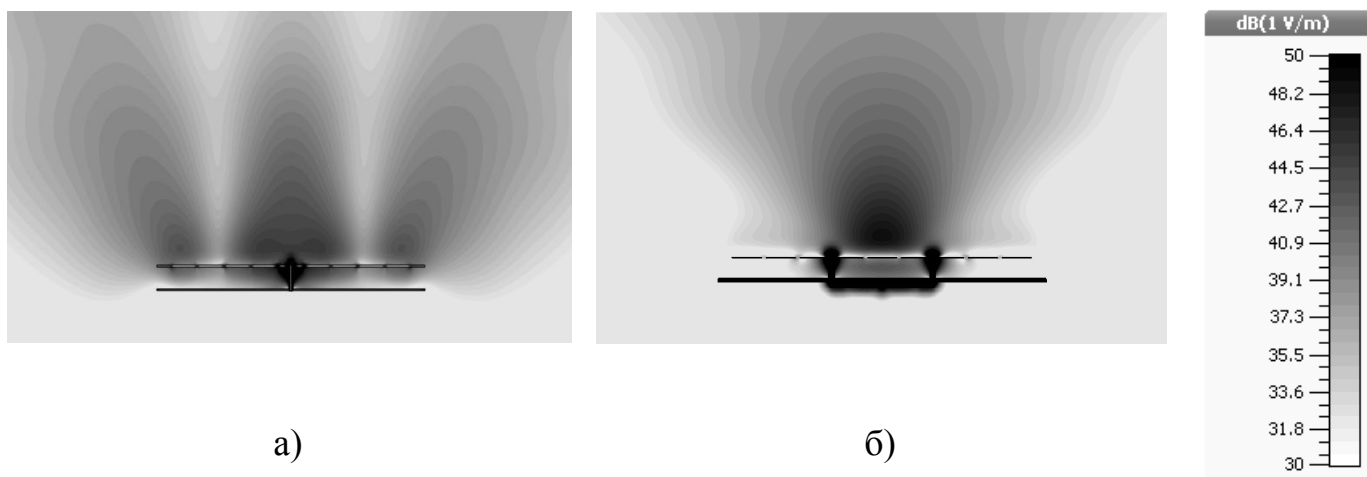
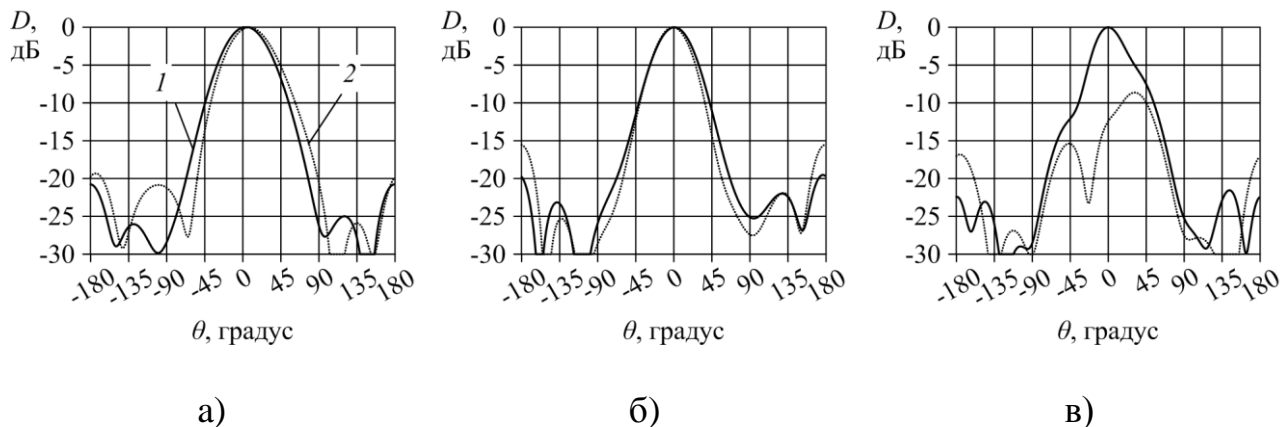


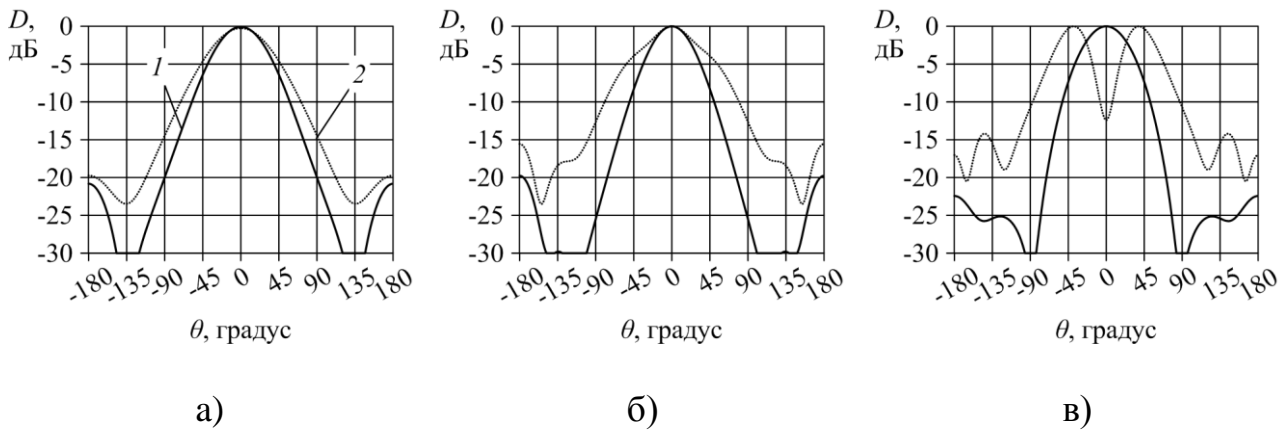
Рис. 7. Распределение вектора напряженности электрического поля в Н – плоскости излучателя: а) – одиночный излучатель; б) – «сдвоенный» излучатель.

На рис. 8, 9 приведены ДН одиночного излучателя и «сдвоенного» излучателя в Е- и Н-плоскостях на различных частотах. Использование «сдвоенного» излучателя позволило устранить провал в Н-плоскости ДН на частоте 2.4 ГГц.



1 – «сдвоенный» излучатель; 2 – одиночный излучатель.

Рис.8. Диаграмма направленности вибраторного излучателя в Е-плоскости: а) – $1.7 f / f_0$; б) - $2 f / f_0$; в) – $2.1 f / f_0$



1 – «двойной» излучатель; 2 – одиночный излучатель.

Рис.9. Диаграмма направленности вибраторного излучателя в **H**-плоскости:

а) – $1.7 f / f_0$; б) – $2 f / f_0$; в) – $2.1 f / f_0$

В таблице 1 приведены высота профиля, продольные размеры и полоса рабочих частот для известных из литературы низкопрофильных АС и для разработанной АС. Разработанная АС имеет более широкую рабочую полосу частот по сравнению с разработками [6-10, 14]. Варианты [13, 15, 17] Выполнены на прямоугольной АМС структуре и неприменимы при разработке двухполяризованных АС. АС [16] имеет более высокий профиль, по сравнению с предложенной разработкой.

Таблица 1 – Параметры известных из литературы низкопрофильных АС.

Статья	Высота профиля	Продольные размеры	Рабочая полоса частот
[6]	$0.059\lambda_0$	$0.64\lambda_0 \times 0.7\lambda_0$	6%
[7]	$0.14\lambda_0$	$0.33\lambda_0 \times 0.45\lambda_0$	16.8%

[8]	$0.012\lambda_0$	$0.54\lambda_0 \times 0.54\lambda_0$	18%
[9]	$0.029\lambda_0$	$1.62\lambda_0 \times 1.62\lambda_0$	24.4%
[10]	$0.055\lambda_0$	$0.87\lambda_0 \times 0.87\lambda_0$	14.0%
[13]	$0.041\lambda_0$	$0.71\lambda_0 \times 0.53\lambda_0$	36% (KCB<2.5)
[14]	$0.057\lambda_0$	$0.69\lambda_0 \times 0.69\lambda_0$	33% (KCB<2.5)
[15]	$0.133 \lambda_0$	$1.17\lambda_0 \times 1.9\lambda_0$	86.48%
[16]	$0.12\lambda_0$	$2.52\lambda_0 \times 2.52\lambda_0$	36.7%
[17]	$0.136\lambda_0$	$1.38\lambda_0 \times 1.38\lambda_0$	63%
Разработанная АС	$0.093\lambda_0$	$1.3\lambda_0 \times 1.3\lambda_0$	40% (KCB<2.0)

Заключение

Разработана широкополосная низкопрофильная антенная система L-диапазона на основе искусственного магнитного проводника. Использование «сдвоенного» излучателя позволило при высоте профиля $0.093\lambda_0$ обеспечить KCB<2 и КУ>10.0 дБ в полосе 40%. Для подтверждения корректности полученных результатов, проведено моделирование методами конечных разностей во временной области и методом конечных элементов, показавшее их хорошее совпадение. Проведено сравнение разработанной антенной системы с классическим вариантом излучателя,

расположенного в центре АМС структуры, показавшее возможность устранения провала в ДН. Результаты сравнения разработанной АС показали ее преимущества по сравнению с известными типами антенн на АМС структуре.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки двухполяризационных антенных систем.

Библиографический список

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. - М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. Верба В.С. Траектория полета. ЦКБ-17, НИИ-17, МНИИП, ОАО «Концерн «Вега» - М.: Оружие и технологии, 2005. – 252 с.
3. Nakano H. Low-Profile Natural and Metamaterial Antennas. Wiley-IEEE Press, 2016. 304 p.
4. Yang F., Rahmat-Samii Y. Electromagnetic band gap structures in antenna engineering. Cambridge University Press. 2009. 266 p.
5. Sievenpiper D.F., Zhang L., Broas R.F.J., Alexopolous N.G., Yablonovitch E. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 1999. Vol. 57. № 11. pp. 2059-2074.
6. Andrea Vallecchi, Javier R. De Luis, Filippo Capolino, Franco De Flaviis. Low Profile Fully Planar Folded Dipole Antenna on a High Impedance Surface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60. № 1, pp. 51–62.

7. Yong-Wei Zhong, Guo-Min Yang, Li-RongZhong. Gain enhancement of bow-tie antenna using fractal wideband artificial magnetic conductor ground // *Electronics Letters*. 2015. Vol. 51. № 4, pp. 315–317.
8. Haider R. Raad, Ayman I. Abbosh, Hussain M. Al-Rizzo, Daniel G. Rucker. Flexible and Compact AMC Based Antenna for Telemedicine Applications // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013. Vol. 61. No. 2. pp. 524–531.
9. Tangjie Yuan, Habiba H. Ouslimani, Alain C. Priou, Guillaume Lacotte, Gerard Collignon. Dual-Layer EBG Structures for Low-Profile “Bent” Monopole Antennas // *Progress In Electromagnetics Research B*. 2013. Vol. 47, pp. 315-337.
10. Волков А.П., Козлов К.В., Асиновский Г.С., Мезин В.Р. Низкопрофильный двухполяризационный излучатель АФАР Р диапазона // *Антенны*. 2016. №9. С. 96–101.
11. Steven R. Best, Drayton L. Hanna. Design of a Broadband Dipole in Close Proximity to an EBG Ground Plane // *IEEE Antennas Propagation Magazine*. 2008. Vol. 50. № 6, pp. 52–64.
12. Filippo Costa, Olli Luukkonen, Constantin R. Simovski, Agostino Monorchio, Sergei A. Tretyakov, Peter M. de Maagt. TE Surface Wave Resonances on High-Impedance Surface Based Antenna: Analysis and Modeling // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2011. Vol. 59. № 10, pp. 3588–3596.
13. Mohammed ZiaulAzad, and Mohammad Ali. Novel Wideband Directional Dipole Antenna on a Mushroom Like EBG Structure // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2008. Vol. 56. № 5, pp. 1242–1250.

14. Jean-Marc Barfco, Luka Salghetti-Drioli, Peter de Maagt. AMC Low Profile Wideband Reference Antenna for GPS and GALLILEO Systems // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008. Vol. 56. № 8, pp. 2540–2547.
15. Hossein Malekpoor, Shahrokh Jam. Improved Radiation Performance of Low Profile Printed Slot Antenna Using Wideband Planar AMC // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 64. № 11. pp. 1506 – 1513.
16. Wei Hu, Rui-Na Lian, Zhao-Yang Tang, Ying-Zeng Yin, Wideband, Low-Profile. Dual-Polarized Slot Antenna with an AMC Surface for Wireless Communications // International Journal of Antennas and Propagation. 2016. Vol. 2016. Article ID 7641382. 8 p.
17. C. Joshi, A. C. Lepage, J. Sarrazin, and X. Begaud. Enhanced Broadside Gain of an Ultra-wide band Diamond Dipole Antenna Using a Hybrid Reflector // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 64. № 7. pp. 3269-3274.
18. Гринев А.Ю., Курочкин А.П., Волков А.П. Низкопрофильная развязанная антенная система на основе поверхности с высоким импедансом // Антенны. 2014. № 9. С. 4–11.
19. Волков А.П. Периодические СВЧ композитные структуры в бортовых антенных системах: дисс. канд. тех. наук. – М.: 2017. – 154 с.
20. Измайлов А.А. Низкопрофильный элемент антенной системы Р – диапазона // VII-я научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО, ПАО НПО «Алмаз», Москва, 2016. С. 227 – 231.

21. Добычина Е. М., Снастин М. В., Обухов А. Е., Харалгин С. В. Испытания антенных решеток бортовых радиолокационных систем в антенном измерительно-вычислительном комплексе // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=75661>