

УДК 621.391.82

ЛИНЕЙНАЯ РЕШЕТКА РАМОЧНЫХ АНТЕНН С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И КВАЗИИЗОТРОПНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТИ

Т.Н. ПАРФЕНОВИЧ, О.А. ЮРЦЕВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 6 февраля 2017

Аннотация. Приводятся результаты численного моделирования линейной решетки рамочных антенн с длиной периметра, равной двум длинам волн на средней частоте. Рамки изогнуты в электрической плоскости для получения квазиизотропной диаграммы направленности в этой плоскости и соединены между собой последовательно.

Ключевые слова: рамочная антенна, последовательное соединение, квазиизотропная диаграмма направленности.

Abstract. The results of numerical modeling of linear array of loop antennas with perimeter length equal to two wavelengths on a central frequency are given. Frames are bent in the electric plane to produce electrical quasi-isotropic directivity pattern in this plane and are serial interconnected.

Keywords: loop antenna, serial connection, quasi-isotropic radiation pattern.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 105, No. 3, pp. 5–11

Linear array of loop antennas with serial excitation and quasi-isotropic radiation pattern in the electric plane

T.N. Parfenovich, O.A. Yurtsev

Введение

Рамочные антенны уже много лет используются в различных радиосистемах. Обычно используется рамочная антенна с двумя параллельно соединенными рамками. В каждой из них длина периметра равна длине волны на средней частоте (одноволновая рамка) [1, 2]. Двухволновая рамка имеет коэффициент направленного действия (КНД) примерно на 3 дБ больше, чем одноволновая рамка. Но ее входное сопротивление высокое, что затрудняет согласование. Однако соединение двухволновых рамок в линейную решетку с последовательным возбуждением понижает входное сопротивление. Кроме того, это приводит к увеличению КНД. Такая решетка кратко описана в работах [3, 4]. В настоящей статье приводятся результаты более подробного численного моделирования линейной решетки двухволновых рамок с последовательным соединением. Рамки изогнуты (сломаны) в электрической плоскости для получения диаграммы направленности, близкой к изотропной в электрической плоскости.

Конструкция антенн

Схематически исследуемая антенная решетка двухволновых рамок показана на рис. 1. Возбуждающая ЭДС подключается между точками «а» и «б», что показано на рис.1, а, б. На рисунке обозначено: L – длина стороны рамки; D – длина зазора возбуждения; α (Alfa) – угол между двумя сторонами рамки (рис.1, в); β (beta) – угол при вершине рамок. На рис. 1, а, б

показаны антенны с углом $\alpha = 180^\circ$. От этого угла зависит степень равномерности (изотропности) диаграммы направленности (ДН) в горизонтальной плоскости XZ . Эта плоскость является электрической. Любая вертикальная плоскость, содержащая ось Z , является магнитной. Далее число рамок в антенне обозначается символом Nz . На рис. 1, *a*, *б* – $Nz = 4$, на рис. 1, *в* – $Nz = 3$. Число рамок снизу от точек возбуждения обозначается ниже символом Na , сверху от точек возбуждения – символом Nd ($Nz = Na + Nd$).

На рис. 1, *б* показан возможный вариант возбуждения с помощью двухпроводной линии. На рис. 1, *в* точки возбуждения не показаны. При численном моделировании антенны возбуждающая ЭДС вводится в центр проводника, соединяющего левую и правую половины рамок и расположенного по оси Y (рис. 1, *в*).

Все расчеты сделаны с помощью программы MMANA [5] и оригинальной программы. В обеих программах используется метод интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении [6].

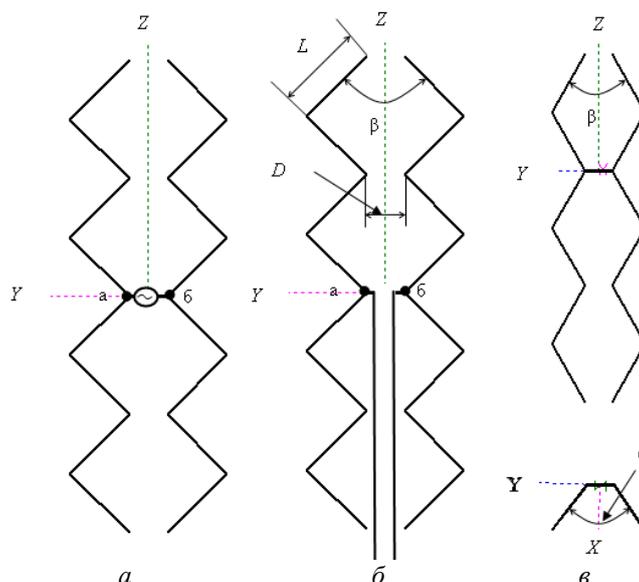


Рис. 1. Конструкция антенны

Результаты численного моделирования

На рис. 2, *a* показана зависимость неравномерности ДН в горизонтальной плоскости от угла α . Под неравномерностью понимается величина NR , равная отношению максимального значения амплитуды электрического поля к минимальному значению в зависимости поля от азимутального угла φ в плоскости XY . При $NR = 1$ (0 дБ) ДН в горизонтальной плоскости представляет собой окружность (изотропна). Как видно, наиболее изотропная ДН формируется при $\alpha = 70^\circ$. Для трех углов α ДН в горизонтальной плоскости для решетки с $Nz = 4$ показана на рис. 2, *б–г* на средней частоте (длина стороны рамки $L = 0,5\lambda$, λ – длина волны). Численный анализ показывает, что неравномерность NR практически не зависит от числа рамок в антенне, длины L и частоты, но зависит существенно от угла β . Приведенные на рис. 2 результаты соответствуют $\beta = 70^\circ$. От угла β зависят также и другие характеристики и параметры антенны – ДН, КНД, входное сопротивление. Зависимость входного сопротивления на средней частоте от угла β для ряда значений α приведена на рис. 3 для антенны с $Nz = 4$ (рис. 1, *a*). Радиус провода рамок равен $A_0 = 2,5$ мм (0,0083 средней длины волны). Все ниже приведенные результаты получены для случая, когда средняя частота $f_0 = 1000$ МГц. Причем все геометрические параметры антенны выбирались так, чтобы на средней частоте ДН в горизонтальной плоскости была наиболее равномерной. Из рис. 3 следует, что с ростом угла α входное сопротивление (R и X) уменьшается, а с ростом угла β – растет. Причем величина R достигает максимума при некотором значении β .

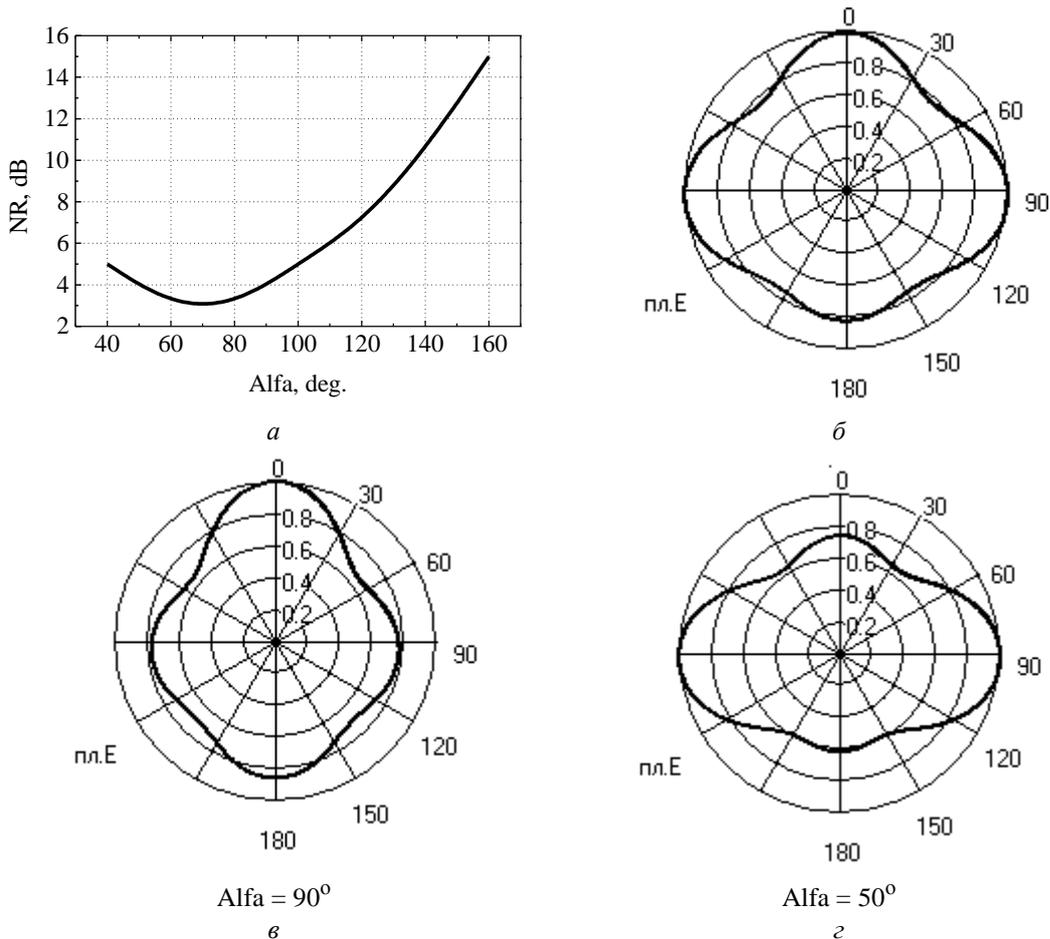


Рис. 2. Зависимость неравномерности NR от угла α (а) и ДН в горизонтальной плоскости при $\alpha = \beta = 70^\circ$ (б, в, з)

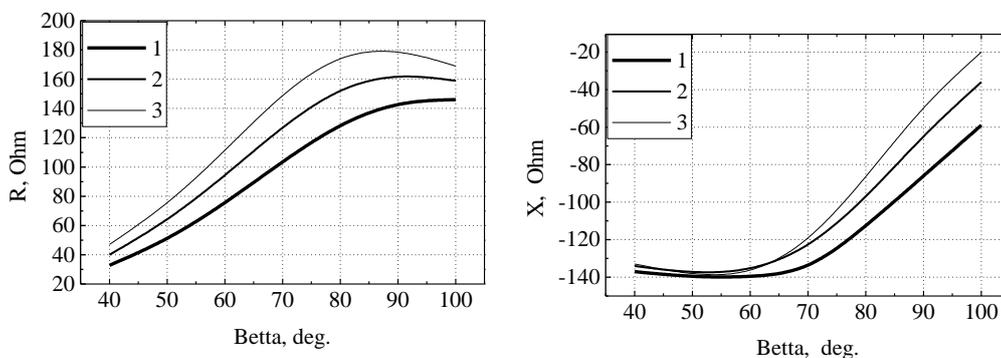


Рис. 3. Зависимость активной (R) и реактивной (X) частей входного сопротивления от угла β для решетки с $N = 4$: 1 – $\alpha = 60^\circ$, 2 – $\alpha = 80^\circ$, 3 – $\alpha = 100^\circ$

Расчеты показывают, что при изменении угла β коэффициент направленного действия достигает максимума при значении $\beta = 65^\circ - 75^\circ$ при всех значениях α из интервала $60^\circ - 100^\circ$. Таким образом, для обеспечения наиболее равномерной ДН в горизонтальной плоскости углы α и β необходимо выбирать равными $65^\circ - 75^\circ$. Все далее приведенные результаты моделирования сделаны для $\alpha = \beta = 70^\circ$.

Проведенный анализ показал, что для разного числа рамок (Nz) КНД достигает максимума при некоторой оптимальной длине стороны рамки L . Причем это значение разное при различном числе рамок. При изменении Nz от 6 до 18 оптимальная величина L меняется от $0,497\lambda_0$ до $0,51\lambda_0$ (λ_0 – средняя длина волны). График зависимости КНД от числа рамок при оптимальной величине L показан на рис. 4, а. На рис. 4, б показана зависимость входного сопротивления от числа рамок на средней частоте 1000 МГц при оптимальной по КНД длине стороны рамки L .

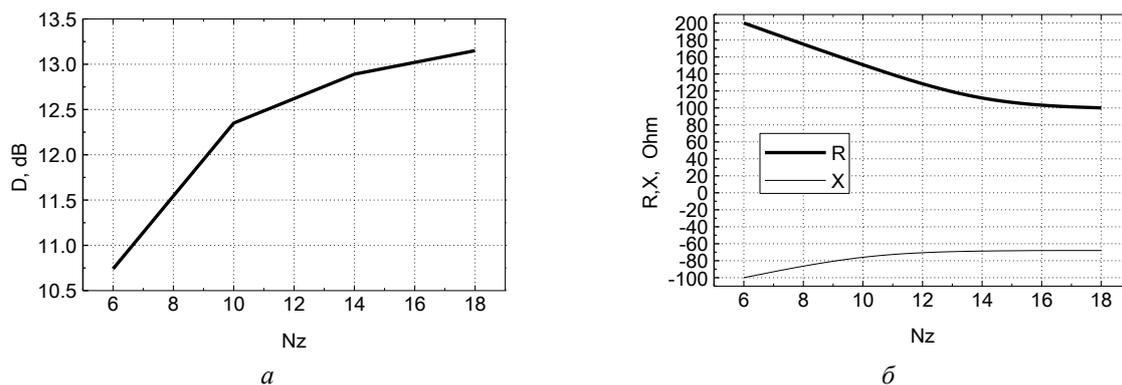


Рис. 4. Зависимость от числа рамок значения КНД (а) и входного сопротивления (б) на средней частоте 1000 МГц при оптимальной длине стороны рамки

При изменении частоты изменяются входное сопротивление, диаграмма направленности и КНД. Причем изменение ДН в плоскости E (электрической или горизонтальной) незначительно. Но в плоскости H (магнитной или вертикальной) изменение существенно. Это связано с тем, что каждая предыдущая рамка (начиная от точек возбуждения) является фидерной линией для последующей рамки на средней частоте при геометрических параметрах, обеспечивающих максимум КНД. Фазовый набег на одной рамке близок к 360° . При этом все рамки возбуждаются синфазно, ширина главного лепестка и уровень боковых лепестков (УБЛ) минимальны. При отклонении частоты от средней частоты растет фазовая разница возбуждения между рамками (расфазировка). При этом главный лепесток ДН расширяется (или даже раздваивается), УБЛ растет, КНД уменьшается. Эти выводы иллюстрируются рис. 5, на котором показаны в полярных координатах ДН на средней частоте $f_o = 1000$ МГц и на частоте 900 МГц при $N_z = 10$.

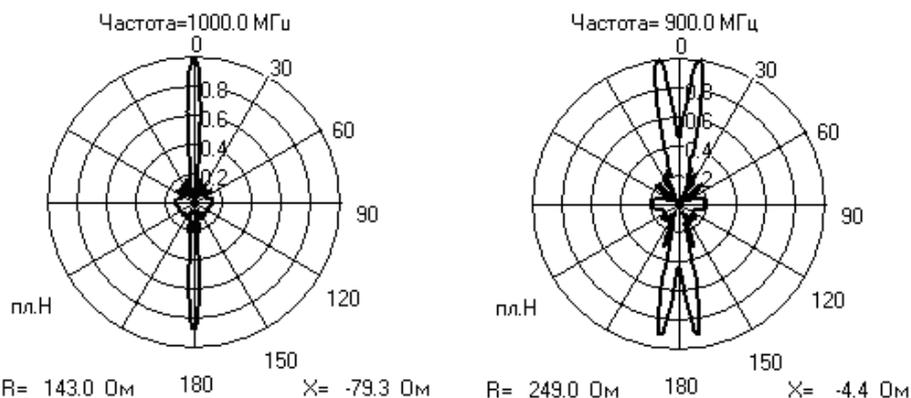


Рис. 5. ДН в вертикальной плоскости решетки с параметрами: $N_z = 10$, $L = 150$ мм, $\alpha = \beta = 70^\circ$

На средней частоте УБЛ < -13 дБ. Это значит, что амплитуда токов в сторонах рамки уменьшается с ростом номера рамки (с удалением рамки от центра антенны). При увеличении числа рамок уменьшается полоса частот, в которой ДН сохраняет приемлемую форму по УБЛ и форме главного лепестка. Относительную полосу частот $DF = (f_{\max} - f_{\min}) / f_o$ удобно оценить по величине уменьшения КНД при отклонения частоты от средней частоты f_o . На графике рис. 6 показана зависимость относительной полосы частот DF от числа рамок N_z . За среднюю частоты f_o удобно взять частоту, соответствующую максимуму КНД. Эта частота близка, как ранее указывалось, к значению, при котором длина стороны рамки равна половине длины волны. График соответствует $f_o = 1000$ МГц, радиус проводников рамок $A_o = 2,5$ мм. Длина стороны рамки для каждого значения N_z бралась соответствующей максимуму КНД. Граничные частоты f_{\min} и f_{\max} соответствуют уменьшению КНД на 3 дБ по сравнению с его значением на средней частоте. На рис. 6, б показана зависимость длины стороны рамки, нормированной к средней длине волны ($L' = L/\lambda_o$) от числа рамок N_z .

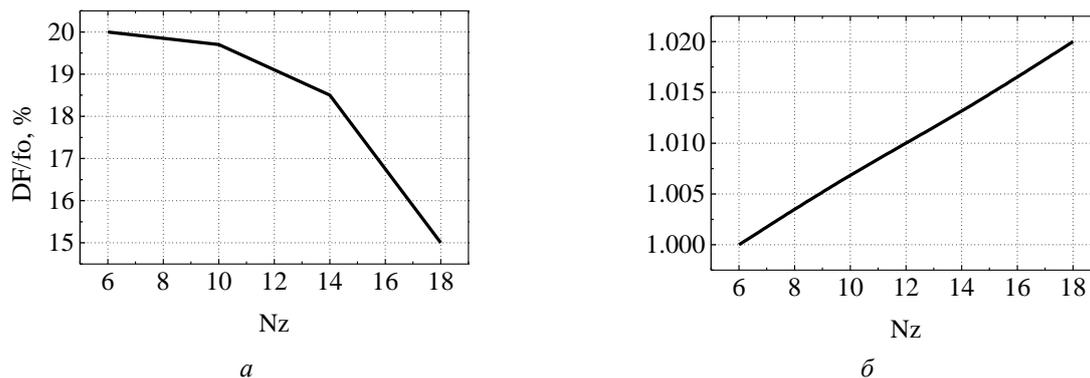


Рис. 6. Зависимость относительной полосы частот (а) и зависимость длины стороны рамки (б), нормированной к средней длине волны и оптимальной по КНД, от числа рамок N_z

Из рис. 6, а следует, что с увеличением числа рамок полоса частот уменьшается. Этот результат ожидаемый: с увеличением числа рамок растет их расфазировка с отклонением частоты от средней частоты. Вместе с тем, необходимо отметить, что с ростом числа рамок уменьшается амплитуда токов в рамке при удалении ее от центральной рамки. Это ведет к уменьшению уровня боковых лепестков ДН. В решетке из двух рамок этот уровень равен -13 дБ – соответствует равномерному амплитудному распределению возбуждения излучателей в решетке. В решетке с 18 рамками уровень боковых лепестков равен -18 дБ. С уменьшением уровня возбуждения крайних рамок возрастает ширина главного лепестка ДН, что ведет к уменьшению КНД. Поэтому с увеличением числа рамок в антенне на ширину главного лепестка ДН и КНД действуют два фактора. Первый: увеличение волновой длины линейной решетки рамочных антенн приводит к уменьшению ширины главного лепестка ДН и, следовательно, к росту КНД. Второй: в то же время уменьшение уровня возбуждения крайних рамок приводит к увеличению ширины главного лепестка ДН и к уменьшению КНД. Вследствие влияния указанных факторов при увеличении числа рамок скорость уменьшения ширины главного лепестка ДН и роста КНД замедляется. Рис. 4, а иллюстрирует это по отношению к КНД. Эти закономерности можно проиллюстрировать также с помощью известных из общей теории антенн формул. Рассмотрим это. Решетка рамочных антенн с последовательным возбуждением является линейной эквидистантной решеткой излучателей. В линейных антенных решетках с равномерным амплитудным и фазовым распределением возбуждения излучателей для оценки КНД (D) и ширины главного лепестка ДН ($2\theta_{0,5}$) при числе излучателей, большем 10, часто используются формулы, полученные при анализе множителя системы [7]:

$$D = A \frac{L}{\lambda}; \quad 2\theta_{0,5} = B \frac{\lambda}{L}.$$

Зависимости коэффициентов A и B от числа рамок, полученные в результате численного моделирования решетки рамочных антенн, показаны на рис. 7.

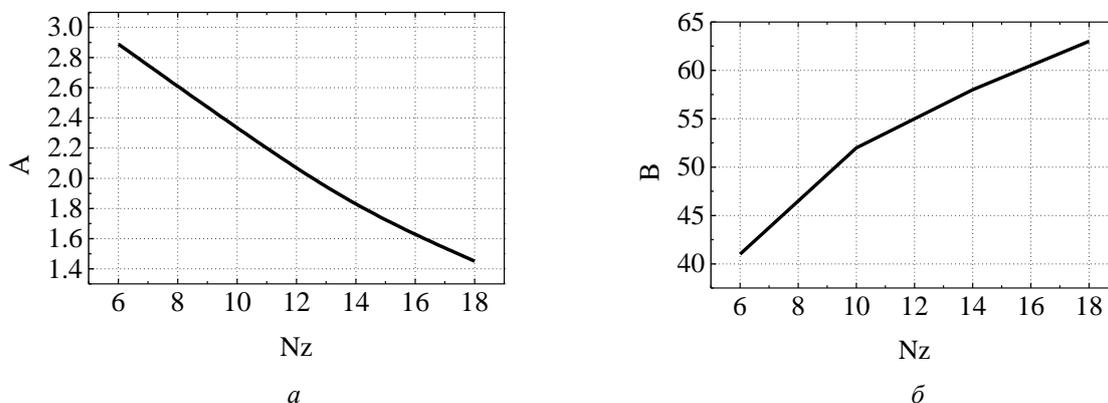


Рис. 7. Зависимости коэффициентов A и B от числа рамок

При равномерном амплитудном и фазовом распределении возбуждения излучателей в линейной решетке $A = 2$ и $B = 51^\circ$. Рассматриваемая решетка рамочных антенн согласована в широком диапазоне частот. Численный анализ показал, что коэффициент стоячей волны в линии с волновым сопротивлением 150 Ом менее двух в диапазоне частот $f_o \pm 40\%$ при числе рамок от 6 до 18.

Заключение

Проведенный численный анализ решетки рамочных антенн с последовательным возбуждением показал, что антенна является широкополосной, особенно по импедансному согласованию. Излом рамок в электрической плоскости позволяет получить ДН с неравномерностью NR в этой плоскости не более 2–3 дБ. Увеличение числа рамок позволяет достичь КНД до 12–13 дБ. Это соответствует числу рамок $Nz = 14–18$. Больше число рамок применять нецелесообразно, так как при $Nz > 18$ рост КНД с увеличением числа рамок сильно замедляется. При указанном числе рамок ширина главного лепестка уменьшается до $12^\circ–10^\circ$ в магнитной плоскости. Приведенные выше результаты моделирования соответствуют случаю, когда число рамок сверху и снизу от точек возбуждения (a и b на рис. 1) одинаково ($Na = Nd$). Если $Na \neq Nd$, то максимум ДН отклоняется от нормали к линии расположения рамок в сторону большего числа рамок. При увеличении асимметрии в числе рамок сверху и снизу активная часть входного сопротивления уменьшается, реактивная – растет по модулю.

Рассмотренную решетку рамочных антенн целесообразно применять в системах наземной связи как вертикальную антенну с квазиизотропной ДН в горизонтальной плоскости.

Список литературы

1. Харченко К.П. УКВ антенны. М.: ДОСААФ, 1969. 68 с.
2. Ротхамель К. Антенны. Том 1,2. Минск: ОМО «Наш город», 2001. 416 с.
3. Yurtsev O.A., Ptashinsky G.V. Numerical Simulations of radiation and scattering characteristics of dipole and LOOP antennas. / Chapter 9 in Book «Numerical Simulations – Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics» // Edited by: Lutz Angermann. InTech. 2010. P. 157–190.
4. Ptashinsky G. Linear Array Loop Antenna with series excitation, with sector-shaped and isotropic directional pattern in electrical plane. // International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'10, Odessa, 16–20 September 2013. P. 295–297.
5. Гончаренко И.В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио». 2002. 80 с.
6. Вычислительные методы в электродинамике. / Под ред. Р. Митры. М.: Мир, 1977. 485 с.
7. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. 427 с.

References

1. Harchenko K.P. UKV antenni. M. DOSAAF 1969. 68 s. (in Russ.)
2. Rothamel K. Antenni. Tom 1, 2. Mn. OMO «Nash gorod» 2001. 416 s. (in Russ.)
3. Yurtsev O.A., Ptashinsky G.V. Numerical Simulations of radiation and scattering characteristics of dipole and LOOP antennas. / Chapter 9 in Book «Numerical Simulations – Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics» // Edited by: Lutz Angermann. InTech. 2010. P. 157–190.
4. Ptashinsky G. Linear Array Loop Antenna with series excitation, with sector-shaped and isotropic directional pattern in electrical plane. // International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'10, Odessa, 16–20 September 2013. P. 295–297. (in Russ.)
5. Goncharenko I.V. Kompyuternoe modelirovanie antenn. Vse o programme MMANA. M. IP RadioSoft Jurnal «Radio». 2002. 80 s. (in Russ.)
6. Vichislitel'nyy metodi v elektrodinamike. / Pod red. R. Mitri. M. Mir 1977. 485 s. (in Russ.)
7. Sazonov D.M. Antenni i ustroystva SVCh. M. Vissaya shkola 1988. 427 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Юрцев О.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Парфенович Т.Н., ассистент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-379-21-43;
e-mail: mailbox_t@mail.ru;
Парфенович Тарас Николаевич

Information about the authors

Yurtsev O.A., D. Sci., professor, professor of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Parfenovich T.N., assistant of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university of informatics and
radioelectronics
tel. +375-29-379-21-43;
e-mail: mailbox_t@mail.ru;
Parfenovich Taras Nikolaevich