Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.67.012.12

Оригинальная статья

https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-1-6-14

Исследование диаграммы обратного излучения квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном больших электрических размеров

Е. Р. Гафаров⊠, Ю. П. Саломатов

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия [™]egafarov@sfu-kras.ru

Аннотация

Введение. Устойчивость антенн глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) к многолучевой интерференции во многом определяется крутизной амплитудной диаграммы направленности (ДН) в области скользящих углов (углов, близких к горизонту). Крутизна ДН антенны определяется размером ее экрана. В статье представлено исследование зависимости крутизны амплитудной ДН от диаметра экрана квадрупольной антенны *R*.

Цель исследования. Анализ влияния диаметра обычного и высокоимпедансного экранов на ДН и диаграмму обратного излучения (ДОИ) квадрупольной антенны, в том числе в области скользящих углов.

Материалы и методы. Численные исследования проведены в САПР CBЧ (CST Studio Suite) методом конечных элементов (finite element method – FEM) и методом конечных разностей во временной области (FDTD), а также методами постобработки результатов.

Результаты. Проведено моделирование квадрупольной антенны с емкостным высокоимпедансным и плоским проводящим экранами. Установлено наличие зависимости средней крутизны ДН на скользящих углах от диаметра экрана на нижней $(f_{\rm H})$ и верхней $(f_{\rm B})$ частотах ГНСС. В ходе исследования выполнен анализ ДН, отношения назад/вперед (down/up или DU), коэффициента усиления в направлении на горизонт (горизонтальное усиление – ГУ) и коэффициента многолучевости (MR) для диаметра R=1...20 длин волн высокоимпедансного и проводящего экранов. Выявлено, что с целью получения высокой крутизны ДН на скользящих углах возможно применение различных типов экранов, но низкий уровень ДОИ достижим только с применением высокоимпедансной структуры. Показано, что одну и ту же крутизну амплитудной ДН (около 1 дБ/°) для нижних частот (НЧ) ГНСС возможно получить при разных диаметрах экрана $R=12\lambda_0$ и, предположительно, $20\lambda_0$.

Заключение. Высокоимпедансный экран решетки вертикальных стержней диаметром $R = 12\lambda_0$ является предпочтительным для квадрупольной антенны на НЧ ГНСС. Дальнейшее увеличение экрана может лишь незначительно улучшать его характеристики.

Ключевые слова: антенна ГНСС, высокоимпедансный экран, проводящий экран, диаграмма обратного излучения

Для цитирования: Гафаров Е. Р., Саломатов Ю. П. Исследование диаграммы обратного излучения квадрупольной антенны с высокоимпедансным экраном больших электрических размеров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 1. С. 6–14. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-6-14

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.11.2020; принята к публикации после рецензирования 20.12.2020; опубликована онлайн 25.02.2021



Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

Original article

Study of the Backscatter Radiation Pattern of a Quadrupole Antenna with a High-Impedance Ground Plane of Large Electrical Sizes

Evgeniy R. Gafarov™, Yury P. Salomatov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia □egafarov@sfu-kras.ru

Abstract

Introduction. The multipath resistance of GNSS antennas is largely determined by the gain slope of the amplitude radiation pattern at sliding angles (angles close to the horizon). The gain slope of the antenna radiation pattern is determined by the size of its ground plane. This article investigates the dependence between the gain slope and ground plane diameter *R* of a quadrupole antenna.

Aim. To analyse the impact of the diameter of conventional and high-impedance ground planes on the backscatter radiation pattern of a quadrupole antenna at sliding angles.

Materials and methods. Computer simulations were carried out in CAD CST Studio Suite using the methods of finite element analysis (FEM), finite difference time domain (FDTD) and template based post-processing.

Results. Quadrupole antennas with a capacitive high-impedance ground plane and a conventional flat ground plane were simulated. The dependence of the average gain slope at sliding angles on the diameter of the ground plane was determined at low $(f_{\rm H})$ and upper $(f_{\rm B})$ GNSS frequencies. The analysis of the down/up ratio, the roll-off gain and the multipath ratio for R=1...20 of the wavelength of capacitive high-impedance and ground planes conventional flat was performed. It was established that higher gain slopes can be obtained using different types of ground planes; however, lower backscatter radiation values are achievable only using high-impedance structures. It was observed that the same slope of the radiation pattern (about 1 dB/°) for GNSS lower frequencies can be obtained at different $R=12\lambda_0$, and, presumably, at $20\lambda_0$.

Conclusion. A high-impedance ground plane with a diameter of $R = 12\lambda_0$ is preferable for a quadrupole antenna at low GNSS frequencies. A further increase in the ground plane size will insignificantly improve its characteristics.

Keywords: GNSS antenna, high impedance ground screen, conventional ground screen, backward radiation pattern

For citation: Gafarov E. R., Salomatov Yu. P. Study of the Backscatter Radiation Pattern of a Quadrupole Antenna with a High-Impedance Ground Plane of Large Electrical Sizes. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 6–14. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-1-6-14

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

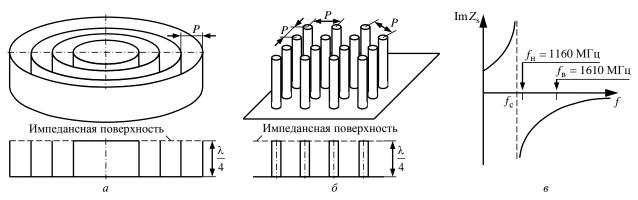
Submitted 17.11.2020; accepted 20.12.2020; published online 25.02.2021

Введение. Экран антенны спутниковой радионавигации является основным элементом, определяющим свойства диаграммы направленности (ДН) под скользящими углами к горизонту и способность антенны к подавлению отражений от рельефа подстилающей поверхности (так называемой многолучевой интерференции). Совместно эти факторы определяют точность и устойчивость работы системы позиционирования [1, 2].

Экраны высокоточных антенн глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) можно классифицировать различным образом:

- по типу: проводящие (ground plane GP) и высокоимпедансные (high impedance structure HIS), а также их комбинацию полупрозрачные экраны;
- по форме: плоские, вогнутые и выпуклые (3D);
- по размеру: малые (не превосходящие длины волны излучения λ) и большие (более λ).

Свойства антенны в рабочем направлении (в так называемой верхней полусфере) описываются ДН, а в противоположном направлении (в нижней полусфере) — диаграммой обратного излучения (ДОИ). Наиболее простой способ уменьшения



 $Puc.\ 1.$ Высокоимпедансная поверхность, сформированная гофрированным фланцем (a) и решеткой стержней с треугольной сеткой (δ). Частотная зависимость реактивного сопротивления решетки стержней (s)

Fig. 1. High-impedance surface formed by a choke ring (a) and a rod array (δ) .

Frequency dependence of reactance of rod array (s)

ДОИ состоит в использовании обычного плоского проводящего экрана, расположенного за антенной [3, 4]. Однако проводящие экраны могут искажать как фазовую, так и амплитудную ДН, поэтому в ГНСС экраны такого типа не нашли широкого применения. Наибольший интерес представляет анализ высокоимпедансных экранов, уменьшение ДОИ в которых сопровождается повышением стабильности фазового центра и увеличением кроссполяризационной развязки [5]. Важное свойство высокоимпедансных поверхностей состоит в уменьшении амплитуды поверхностных волн благодаря формированию искусственного реактивного импеданса из проводящих областей.

Высокоимпедансные экраны для антенн ГНСС в виде структур гофрированного фланца (choke ring) известны с конца XX в. Наличие канавок структуры choke ring (рис. 1, a) формирует поверхность с высоким сопротивлением, показанную штриховой линией. В последнее время вместо choke ring применяется штыревая высокоимпедансная структура (рис. $1, \delta$), более простая в изготовлении [6]. Основы функционирования такого экрана подобны структуре choke ring.

Как экран типа choke ring, так и решетка стержней являются емкостными высокоимпедансными поверхностями. Электрические размеры обоих экранов аналогичны. Шаг решетки стержней и расстояние между кольцами структуры choke ring одинаковы и составляют $P \approx \lambda/8$; высота обеих высокоимпедансных поверхностей равна четверти длины волны. Диаметр стержней много меньше длины волны. Параметры высокоимпедансных экранов изучены в [7, 8].

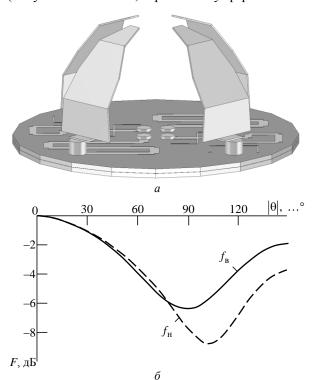
Частотная зависимость импеданса поверхности решетки стержней (рис. 1, в) имеет гиперболическую форму с резонансной частотой $f_{\rm c}$. Нижнюю частоту диапазона ГНСС $f_{\rm H}$ =1160 МГц выбирают вблизи $f_{\mathbf{c}}$. На верхней частоте диапазона $f_{\rm B} = 1610 \ {\rm MF}$ ц импеданс поверхности уменьшается. Для повышения импеданса на $f_{\rm B}$ используют высокоимпедансные поверхности с несколькими резонансами поверхностного сопротивления [9], но для электрически больших экранов второй резонанс не является обязательным [8]. В [10] показано, что высокоимпедансная поверхность в виде решетки стержней обладает меньшей на 30 % крутизной частотной зависимости поверхностного сопротивления по сравнению с choke ring и может использоваться на всех частотах ГНСС. Кроме того, известно [11], что при достаточно высоком импедансе структуры уровень ДН слабонаправленного источника в направлениях, близких к касательным к экрану, практически не зависит от импеданса и определяется только размером экрана. При этом условии ДОИ перестает зависеть от импеданса экрана для любых углов возвышения, что снижает требования к сопротивлению импедансной поверхности.

Неоднократно отмечалась важность резкого перепада коэффициента усиления (КУ) в области скользящих углов для антенн ГНСС [5, 10]. Поэтому в настоящей статье представлены результаты исследований высокоимпедансных и проводящих экранов как малых, так и больших электрических размеров в совокупности со слабонаправленной антенной для оценки ее характеристик направленности.

Методы исследования. Численное моделирование проведено при помощи пакета САПР CST Studio Suite [12] методом конечных элементов (finite element method – FEM) и методом конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием постобработки результатов моделирования (Template based Post-processing).

Результаты исследований.

Квадрупольная антенна. Для исследования с двумя типами экранов использована квадрупольная антенна, так как ее ДН является достаточно широкой как на нижних, так и на верхних частотах ГНСС. Квадрупольная антенна представляет собой антенные элементы в виде четырех монополей (рис. 2, a), запитываемых делителем мощности. Делитель обеспечивает равное деление мощности между монополями со сдвигом фаз между ними 90° с целью формирования поля круговой поляризации. Делитель выполнен в двухслойной реализации для уменьшения размеров антенны. Экран двух слоев делителя и монополей является общим. Размеры антенны 96 × 96 × 45 мм. Антенна является всесистемной, т. е. работает во всех диапазонах частот ГНСС. Типичные ДН на нижней $(f_{\rm H})$ и верхней $\left(f_{\mathrm{B}}\right)$ частотах ГНСС приведены на рис. 2, б (θ – угол возвышения, верхней полусфере соответ-



 $Puc.\ 2.\$ Модель квадрупольной антенны (a) и ее диаграмма направленности (δ)

Fig. 2. Quadrupole antenna model (a) and it's radiation pattern (δ)

ствуют значения угла $\theta = -90...0...90^{\circ}$). Подробное описание антенны представлено в [13].

Квадрупольная антенна имеет широкую ДН, но также и высокий уровень ДОИ. Сохранение широкоугольной ДН на частотах приема навигационных спутников и одновременное уменьшение ДОИ возможно с применением высокоимпедансного экрана.

Анализ поля квадрупольной антенны с экраном большого электрического размера. Проанализирована антенная система (рис. 3), состоящая из слабонаправленной квадрупольной антенны и высокоимпедансного экрана диаметром $R/\lambda_0=1...20$, где $\lambda_0=c/f_0$ (c – скорость распространения электромагнитной энергии в вакууме; $f_0=1400~{\rm MFg}$ – средняя частота диапазона ГНСС). Чтобы исключить зависимость поверхностного импеданса от направления тока в плоскости экрана, стержни высокоимпедансной поверхности расположены на треугольной сетке. Проведено сравнение с квадрупольной антенной на плоском проводящем экране того же диаметра.

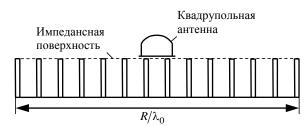
Численное моделирование антенной системы выполнено в среде CST Studio Suite во временной области на прямоугольной сетке (Hexahedral). На первом этапе исследования методом численного моделирования получены ДН. Далее постобработкой данных для скользящих углов (θ = 80...100°) получены вторичные результаты: отношение ДН и ДОИ в нижней полусфере (θ = -90...±180...90°) DU, в направлениях, зеркальных относительно скользящего угла θ = 90°:

$$DU(\theta) = \frac{F(180^{\circ} - \theta)}{F(\theta)}$$

и средняя крутизна ДН в области скользящих углов:

$$\overline{F}'_{\theta} = \left\{ \sum_{\theta=80}^{100} \left[F(\theta) - F(\theta+1) \right] \right\} / 20$$

с шагом $\Delta\theta = 1^{\circ}$.



Puc. 3. Квадрупольная антенна с высокоимпедансной поверхностью решетки стержней

Fig. 3. Quadrupole antenna with high-impedance surface of rod array

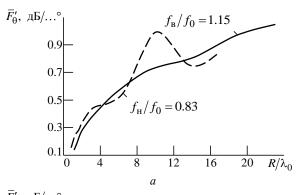
Одним из параметров, характеризующих устойчивость антенны ГНСС к многолучевой интерференции, является средний коэффициент многолучевости (multipath ratio — MR), определенный как отношение среднего КУ в верхней полусфере $\bar{G}_{\theta \in 0...90^{\circ}}$ к среднему КУ в нижней полусфере $\bar{G}_{\theta \in 90...180^{\circ}}$:

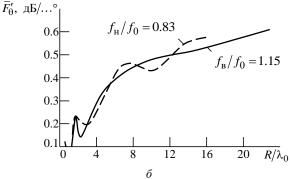
$$\overline{MR} = \frac{\overline{G}_{\theta \in 0...90^{\circ}}}{\overline{G}_{\theta \in 90...180^{\circ}}}.$$

Коэффициент многолучевости также получен в результате постобработки.

Исследование проведено на верхней $f_{\rm B}=c/\lambda_{\rm H}$ и нижней $f_{\rm H}=c/\lambda_{\rm B}$ граничных частотах ГНСС. Характеристики представлены в зависимости от диаметра экрана R, нормированного на длину волны R/λ , для верхней $\left(\lambda=\lambda_{\rm B}\right)$ и нижней $\left(\lambda=\lambda_{\rm H}\right)$ частот диапазона ГНСС. Ввиду симметрии ДН квадрупольной антенны характеристики приведены для углов $\theta\in 0...180^\circ$.

Обсуждение. Анализ зависимости средней крутизны ДН для скользящих направлений от диаметра высокоимпедансного экрана (рис. 4, *a*) пока-

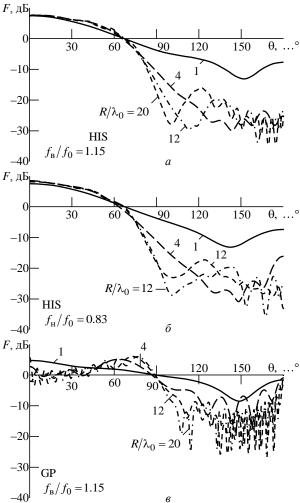




Puc. 4. Зависимость средней крутизны ДН от размера экрана для квадрупольной антенны с HIS (a) и GP (δ)

Fig. 4. Dependence of the radiation pattern average steepness on the size for a quadrupole antenna with the high impedance structure screen (a) and the ground plane screen (δ)

зывает, что при малых размерах экрана $(R/\lambda \le 10)$ крутизна быстро возрастает с увеличением размера экрана, а при больших размерах $(R/\lambda > 10)$ изменяется незначительно. Значения на нижней и верхней границах частотного диапазона ГНСС в области малых R/λ близки, следовательно, запас емкостного импеданса решетки стержней достаточен во всем диапазоне частот. С увеличением диаметра экрана первый минимум ДН (рис. 5, б) вначале перемещается к значению $\theta = 100^{\circ}$, а затем уменьшается. Этим можно объяснить всплеск зависимости при значении диаметра около 12λ (рис. 4, а), где первый минимум ДН приходится на значение угла $\theta = 100^{\circ}$. Из частотной зависимости $DU(\theta)$ (рис. 6) следует преимущество экрана диаметра 12
 λ на $f_{\rm H}.$ На $f_{\rm B}$ первый минимум ДН



Puc.~5.~ДН квадрупольных антенн: a- HIS $f_{\rm B}/f_0=1.15$; 6- HIS $f_{\rm H}/f_0=0.83$; e- GP $f_{\rm B}/f_0=1.15$

Fig. 5. Radiation pattern of the quadrupole antennas: $a-{\rm HIS}~f_{\rm B}/f_0=1.15$; $\delta-{\rm HIS}~f_{\rm H}/f_0=0.83$; $\epsilon-{\rm GP}~f_{\rm B}/f_0=1.15$

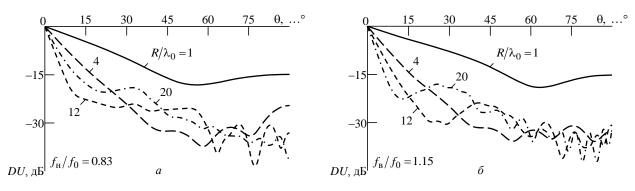


Рис. 6. Отношение ДН и ДОИ квадрупольной антенны с HIS: $a-f_{\rm H}/f_0=0.83$; $\delta-f_{\rm B}/f_0=1.15$

Fig. 6. Radiation pattern vs backward radiation pattern ratio for the quadrupole antenna with HIS: $a - f_{\rm H}/f_0 = 0.83$; $\delta - f_{\rm B}/f_0 = 1.15$

(рис. 5, a) при $R/\lambda = 20$ также приходится на значение угла $\theta = 100^\circ$. Причем в этом случае наблюдаются наилучшие DU и крутизна ДН.

Важно отметить фактическое отсутствие воздействия высокоимпедансного экрана на ДН квадрупольной антенны вплоть до угла $\theta \approx 70^\circ$. Для скользящих углов вид ДН значительно изменяется. Как видно из зависимостей коэффициента усиления при скользящих углах $G_{\theta \in \pm 90^\circ}$ от диаметра высокоимпедансного экрана (рис. 7), ход кривых существенно зависит от диаметра и при $R/\lambda = 4...5$ составляет менее -20 дБ как на верхней, так и на нижней частотах диапазона ГНСС.

Крутизна ДН квадрупольной антенны над проводящим экраном (рис. 5, δ) на $f_{\rm H}$ и $f_{\rm B}$ изменяется аналогично антенне с высокоимпедансным экраном. Однако в последнем случае значения крутизны ДН при $R/\lambda = 20$ почти двукратно превышают значения для антенны с обычным проводящим экраном. Кроме того, за пределами скользящих углов как в нижней, так и верхней полусфере ДН квадрупольной антенны над проводящим экраном при $R/\lambda > 1$ имеет значительную изрезанность, сформированную противофазными токами кромки экрана (рис. 5, в). Этот факт делает затруднительным применение проводящих экранов больших электрических размеров для квадрупольной антенны. Поэтому характеристики усиления при скользящих углах $G_{\theta \,\in\, \pm 90^\circ}$ и DU для антенны над проводящим экраном не приведены. В отличие от квадрупольной антенны применение плоского проводящего экрана большого электрического размера для патч-антенн возможно вследствие малых значений $G_{\theta \in \pm 90^{\circ}}$ [14, 15].

Для квадрупольной антенны с проводящим экраном увеличение R/λ не сопровождается значительным изменением MR (рис. 8). В случае высокоимпедансного экрана это отношение быстро возрастает и максимально в области значений $R/\lambda = 8$, затем имеет место небольшой спад из-за роста первого бокового лепестка ДН (рис. 5).

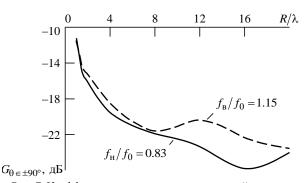


Рис. 7. Коэффициент усиления квадрупольной антенны с HIS на скользящих углах

Fig. 7. The gain of the quadrupole antenna with HIS11 at sliding angles

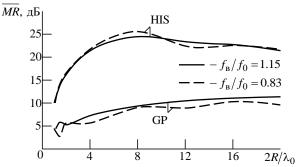


Рис. 8. Средний коэффициент многолучевости исследуемых антенн

Fig. 8. Average multipath of the antennas under study

Заключение. Приведенные результаты исследования показывают, что высокоимпедансный экран диаметром $R/\lambda = 12$ является предпочтительным для квадрупольной антенны. Дальнейшее увеличение экрана лишь незначительно улучшает ее характеристики в области скользящих углов. Тем не менее, как отмечено в [16], подавление отраженного сигнала из нижней полусферы при высоких углах к плоскости экрана прямо пропорционально уровню ДН источника в направлении на экран. Возможности улучшения ДОИ за счет управления шириной ДН для приложений к задачам позиционирования ограничены, так как значительное сужение ДН приводит к опасности срыва слежения за сигналами пригоризонтных спутников. В этой связи с целью увеличения коэффициента усиления при скользящих углах с сохранением диаметра экрана, а значит и крутизны ДН в этой области возможно использование трехмерного (3D) экрана со спадом образующей высокоимпедансной поверхности. В общем случае применение высокоимпедансного экрана диаметром более $R/\lambda = 12$ возможно, если отсутствует габаритное ограничение.

Список литературы

- 1. Татарников Д. В. Экраны антенн высокоточной геодезии по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. Ч. 1: Идеально проводящие и импедансные экраны // Антенны. 2008. № 4 (131). С. 6-19.
- 2. Mitigation of Multipath through the Use of an Artificial Magnetic Conductor for Precision GPS Surveying Antennas / W. E. McKinzie, R. B. Hurtado, B. K. Klimczak, J. D. Dutton // IEEE Ant. and Prop. Intern. Symp. San Antonio, USA, 16-21 June 2002. Proc. Vol. 4. Piscataway: IEEE, 2002. P. 640-643. doi: 10.1109/APS.2002.1017065
- 3. Multiband Three Layer GNSS Microstrip Antenna / E. R. Gafarov, A. A. Erokhin, A. V. Stankovsky, Y. P. Salomatov // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Tomsk, Russia, 18-20 Apr. 2019. Piscataway: IEEE, 2019. Ac. № 18756269. 4 p. doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729623
- 4. Multipath Mitigation by Conventional Antennas with Ground Planes and Passive Vertical Structures / D. V. Tatarnikov, V. Fillipov, I. Soutiaguine, A. Astakhov, A. Stepanenko, P. Shamatulsky // GPS Solutions. 2005. Vol. 9, iss. 3. P. 194–201.
- 5. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / ed. by P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck. Berlin: Springer, 2016. 1206 p. doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_4.
- 6. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. 4th ed. New York: Wiley, 2015. 836 p.
- 7. Tatarnikov D. V, Astakhov A. V. Large Impedance Ground Plane Antennas for mm-accuracy of GNSS Positioning in Real Time // Progress in Electromagnetics Research Symp. Stockholm, Sweden, Aug. 12-15, 2013. Proc. P. 1825-1829.
- 8. Sievenpiper D. F. High Impedance Electromagnetic Surfaces: Ph. D. dissertation / University of California. Los Angeles, 1999. 150 p.
- 9. Modifications to GPS Reference Station Antennas to Reduce Multipath / A. Kerkhoff, R. B. Harris, C. P. Petersen, A. Pickard // Proc. of the 23d Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Sept. Portland, USA, 21-24, 2010. P. 866-878.

- 10. Tatarnikov D. V. Topcon Full Wave GNSS Reference Station Antenna with Convex Impedance Ground Plane URL: https://insidegnss.com/wp-content/uploads/2011/10/Topcon_PN-A5_antenna_white_paper.pdf (дата обращения 14.10.2020)
- 11. Periodic Structures, High Impedance and Semitransparent Surfaces in Antennas for Centimeter and Millimeter Precision of Positioning with the Global Navigation Satellite Systems / D. V. Tatarnikov, A. V. Astakhov, A. P. Stepanenko, A. A. Generalov // J. of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1092. Ac. № 012150. 4 p. doi: 10.1088/1742-6596/1092/1/012150.
- 12. CST STUDIO SUITE 2020 моделирование трехэлектромагнитных структур "Евроинтех". Люберцы, Моск. обл. URL: http://www.eurointech.ru/eda /microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml (дата обращения 09.02.2021)
- 13. Gafarov E. R., Erokhin A. A., Salomatov Y. P. Broadband Four-Fed Circularly Polarized Quadrupole Antenna // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Astana, Kazakhstan, June 29-30, 2017. Piscataway: IEEE, 2017. Ac. № 17082594. doi: 10.1109/SIBCON. 2017.7998468
- 14. On Site Validation in GNSS Stations for Multipath and Interference Mitigation Structure / A. Dessantis, L. Dicecca, L. D'Agristina, V. Crino, P. Gabellini, P. Russo, F. A. Fernandez, A. Castro, A. Quiles, R. Weiler // 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing., Noordwijk, Netherlands, 3-5 Dec. 2014. Piscataway: IEEE, 2014. Ac. № 14947811 doi: 10.1109/NAVITEC.2014.7045137
- 15. Broadband Capacitively Coupled Stacked Patch Antenna for GNSS Applications / D. Li, P. Guo, Q. Dai, Y. Fu / IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2012. Vol. 11. P. 701-704. doi: 10.1109/LAWP.2012.2205129
- 16. Tatarnikov D. V. Semi-Transparent Ground Planes excited by Magnetic Line Current // IEEE Anten. and Propag. 2012. Vol. 60, iss. 6. P. 2843-2852. doi: 10.1109/TAP.2012.2194636

Информация об авторах

Гафаров Евгений Раисович - магистр по направлению "Радиотехника" (2009), аспирант, старший преподаватель кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 30 научных работ. Сфера научных интересов – антенны и СВЧ-устройства; антенны ГНСС и антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: egafarov@sfu-kras.ru

https://orcid.org/0000-0002-7810-7196

Саломатов Юрий Петрович – кандидат технических наук (1982), профессор (2013) кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Автор 240 научных работ. Сфера научных интересов – ФАР; ЦФАР; квазиоптические антенны и антенные решетки.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

https://orcid.org/0000-0003-4309-226X

References

- 1. Tatarnikov D. V. Antenna ground planes for highprecision positioning with the global navigation satellites signals. P. 1. Ideal conducting and impedance ground planes. Antennas. 2008, no. 4 (131), pp. 6–19. (In Russ.)
- 2. McKinzie W. E., Hurtado R. B., Klimczak B. K., Dutton J. D. Mitigation of Multipath through the Use of an Artificial Magnetic Conductor for Precision GPS Surveying Antennas. IEEE Ant. and Prop. Intern. Symp. 16-21 June 2002, San Antonio, USA. Proc. Vol. 4. Piscataway: IEEE, 2002. P. 640-643. doi: 10.1109/APS.2002.1017065
- 3. Gafarov E. R., Erokhin A. A., Stankovsky A. V., Salomatov Y. P. Multiband Three Layer GNSS Microstrip Antenna. Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). 18-20 April 2019, Tomsk, Russia. Piscataway: IEEE, 2019, Ac. no. 18756269, 4 p. doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729623
- 4. Tatarnikov D. V., Fillipov V., Soutiaguine I., Astakhov A., Stepanenko A., Shamatulsky P. Multipath Mitigation by Conventional Antennas with Ground Planes and Passive Vertical Structures. GPS Solutions. 2005, vol. 9, iss. 3, pp. 194-201.
- 5. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Ed. by P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck. Berlin, Springer, 2016, 1206 p. doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_4.
- 6. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. 4th ed. New York, Wiley, 2015, 836 p.
- 7. Tatarnikov D. V, Astakhov A. V. Large Impedance Ground Plane Antennas for mm-accuracy of GNSS Positioning in Real Time. Progress in Electromagnetics Research Symp. Aug. 12-15, 2013, Stockholm, Sweden. Proc., pp. 1825-1829.
- 8. Sievenpiper D. F. High Impedance Electromagnetic Surfaces. Ph. D. dissertation, University of California. Los Angeles, 1999, 150 p.
- 9. Kerkhoff A., Harris R. B., Petersen C. P., Pickard A. Modifications to GPS Reference Station Antennas to Reduce Multipath. Proc. of the 23d Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. September 21-24, 2010. Portland, USA, pp. 866-878.

- 10. Tatarnikov D. V. Topcon Full Wave GNSS Reference Station Antenna with Convex Impedance Ground Plane. Available at: https://insidegnss.com/wp-content/uploads/2011/10/Topcon_PN-A5_antenna_white_paper.pdf (accessed 14.10.2020)
- 11. Tatarnikov D. V., Astakhov A. V., Stepanenko A. P., Generalov A. A. Periodic Structures, High Impedance and Semitransparent Surfaces in Antennas for Centimeter and Millimeter Precision of Positioning with the Global Navigation Satellite Systems. J. of Physics: Conf. Series. 2018, vol. 1092, ac. no. 012150, 4 p. doi: 10.1088/1742-6596/1092/1/012150
- 12. CST MICROWAVE STUDIO 2016. Work flow & Solver Overview. CST MICROWAVE STUDIO, 2016, 124 p. Available at: https://manualzz.com /doc/28231181/cstmicrowave-studio (accessed 2021/09/02)
- 13. Gafarov E. R., Erokhin A. A., Salomatov Y. P. Broadband Four-Fed Circularly Polarized Quadrupole Antenna. Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). June 29-30, 2017, Astana, Kazakhstan. Piscataway, IEEE, 2017, ac. no. 17082594. doi: 10.1109/SIBCON. 2017.7998468
- 14. Dessantis A., Dicecca L., D'Agristina L., Crino V., Gabellini P., Russo P., Fernandez F. A., Castro A., Quiles A., Weiler R. On Site Validation in GNSS Stations for Multipath and Interference Mitigation Structure. 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing. 3-5 Dec. 2014, Noordwijk, Netherlands. Piscataway, IEEE, 2014, ac. no. 14947811. doi: 10.1109/NAVITEC.2014.7045137
- 15. Li D., Guo P., Dai Q., Fu Y. Broadband Capacitively Coupled Stacked Patch Antenna for GNSS Applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2012, vol. 11, pp. 701-704. doi: 10.1109/LAWP.2012.2205129
- 16. Tatarnikov D. V. Semi-Transparent Ground Planes excited by Magnetic Line Current. IEEE Anten. and Propag. vol. 2843-2852. doi: 2012. 60, iss. 6, pp. 10.1109/TAP.2012.2194636

Information about the authors

Evgeniy R. Gafarov, Master's degree in Radio Engineering (2009), postgraduate, senior lecturer of Radio Engineering Department of the Siberian Federal University (SFU). The author of 30 scientific publications. Area of expertise: antennas and microwave devices; GNSS antennas and antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: egafarov@sfu-kras.ru

https://orcid.org/0000-0002-7810-7196

Yury P. Salomatov, Cand. Sci. (Eng.) (1982), Professor (2013) of Department of Radio Engineering of the Siberian Federal University. The author of 240 scientific publications. Area of expertise: phased arrays; digital phased arrays; quasi-optical antennas and antenna arrays.

Address: Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru https://orcid.org/0000-0003-4309-226X