

Моделирование и практическая реализация широкополосной двухгребневой рупорной антенны с шириной рабочей полосы более октавы и высоким уровнем кроссполяризационной развязки

В. В. Мещеряков✉, Н. В. Маркова, П. Д. Юрманов

ООО "Апстек Лабс", Санкт-Петербург, Россия

✉ mescheryakov.v.v@gmail.com

Аннотация

Введение. Для решения задачи радиополяриметрии в многопозиционных микроволновых досмотровых системах (ММДС) с апертурным синтезом необходимо использовать антенны с высоким уровнем кроссполяризационной развязки (КПР) в широком пространственном угле. Восстановление радиоизображений в ММДС происходит на дистанциях, соизмеримых с размерами апертуры антенных структур, поэтому значение пространственного угла, в котором необходимо выполнение требования высокой КПР, может достигать 30°. Таким образом, возникает новая задача создания антенной структуры X- и Ku-диапазонов, применение которой в ММДС позволило бы решить задачу построения радиоизображения деполяризованного микроволнового излучения, рассеянного скрытыми опасными объектами на теле человека.

Цель работы. Разработка приемной антенны жесткой конструкции для долговременной эксплуатации в ММДС с уровнем КПР 28 дБ при пространственном угле 30° и рабочих частотах 8... 20 ГГц.

Материалы и методы. Определены требования для приемной антенны в ММДС. Приведены теоретические обоснования для выбора конструкции антенны. В разработанной ММДС для построения микроволнового изображения используется апертурный синтез. Представлены этапы и результаты моделирования широкополосных двухгребневых антенн в программе трехмерного моделирования электромагнитного поля CST Studio. Рассмотрены результаты моделирования двухгребневых антенн: пирамидальной, конической, в круглом и эллиптическом волноводах. Произведено сравнение результатов измерения в безэховой камере для макета полученной антенны и результатов моделирования.

Результаты. Разработана и изготовлена двухгребневая эллиптическая антенна жесткой конструкции, с КСВН не более 2 и кроссполяризационной развязкой в пространственном угле 30° не менее 28 дБ в диапазоне частот, перекрывающем октаву.

Заключение. Антенна может быть использована в ММДС для детектирования эффекта деполяризации микроволнового излучения скрытыми опасными объектами на теле человека. Высокое значение КПР антенны в широком пространственном угле позволит в дальнейшем внедрить микроволновую поляриметрию в ММДС.

Ключевые слова: двухгребневая рупорная антенна, кроссполяризационная развязка, эллиптическая двухгребневая антенна

Для цитирования: Мещеряков В. В., Маркова Н. В., Юрманов П. Д. Моделирование и практическая реализация широкополосной двухгребневой рупорной антенны с шириной рабочей полосы более октавы и высоким уровнем кроссполяризационной развязки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 42–51. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-42-51

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019; принята к публикации после рецензирования 29.09.2019; опубликована онлайн 29.11.2019

Modeling and Practical Implementation of a Broadband Double-Ridged Horn Antenna with an Operating Range More Than an Octave and a High Level of Cross-Polarization Discrimination

Viktor V. Meshcheriakov✉, Natalia V. Markova, Pavel D. Iurmanov

Apstec Labs LTD, Saint Petersburg, Russia

✉ mescheryakov.v.v@gmail.com

Abstract

Introduction. The resolution of the problem of radio polarimetry in multiposition microwave screening systems (MMSS) with aperture synthesis requires the use of antennas with a high level of cross-polarization discrimination (XPD) in a wide spatial angle. The radio images are reconstructed in MMSS at distances commensurate with the aperture of the antenna structures. Therefore, the value of the spatial angle, at which high XPD is required, can reach 30°. This leads to a new problem of creating an antenna configuration of the X and Ku band, the application of which in MMSS will resolve the problem of constructing a radio image of depolarized microwave radiation scattered on the human body in the form of hidden dangerous objects.

Aim. To develop a double-ridged receiving antenna for long-term operation in MMSS with an XPD level of 28 dB at a spatial angle of 30° and operating frequencies of 8...20 GHz.

Materials and methods. The requirements for the receiving antenna in MMSS were determined. Theoretical justifications were proposed for the choice of antenna design. Aperture synthesis was used to construct microwave images in MMSS. The stages and results of modelling broadband double-ridge antennas were presented using the CST Studio software broadly applied for three-dimensional electro-magnetic field modelling. The results of modelling pyramidal and conical double-ridged antennas, as well as those in circular and elliptical waveguides, were analyzed. The designed antenna was tested in an anechoic chamber. The measurement results were compared with those obtained during simulation.

Results. An elliptical double-ridged horn antenna with a VSWR of no more than 2 and cross-polarization discrimination in a spatial angle of 30° of no less than 28 dB for the frequency range that covers an octave was designed and constructed.

Conclusion. The developed antenna can be used in MMSS for the purpose of detecting the effect of microwave radiation depolarization as hidden dangerous objects on a human body. Such characteristics of the antenna as its high XPD value in a wide spatial angle will allow the future introduction of microwave polarimetry in MMSS.

Key words: double-ridged horn antenna, cross-polarisation discrimination, double-ridged elliptical antenna

For citation: Meshcheriakov V. V., Markova N. V., Iurmanov P. D. Modeling and Practical Implementation of a Broadband Double-Ridged Horn Antenna with an Operating Range More Than an Octave and a High Level of Cross-Polarization Discrimination. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 42–51. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-42-51

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

Submitted 03.06.2019; accepted 29.09.2019; published online 29.11.2019

Введение. В последнее время в многопозиционных микроволновых досмотровых системах (ММДС) для выявления металлических предметов на теле человека часто применяются кросс-поляризационные методы [1]. ММДС, показанная на рис. 1 в месте эксплуатации, предназначена для непрерывного сканирования потока людей на наличие скрытых взрывных устройств и автоматического оружия на теле человека и в рюкзаках.

Она использует метод радиолокационной поляриметрии [2, 3], в котором для получения полной информации о рассеянном от цели поле применяются широкополосные двухгребневые антенны [4, 5]. Для получения достоверных результатов используемые антенные структуры должны иметь высокий уровень кроссполяризационной развязки (КПР) [6, 7], что для частотного диапазона с перекрытием более октавы является сложной техни-

Моделирование и практическая реализация широкополосной двухгребневой рупорной антенны с шириной рабочей полосы более октавы и высоким уровнем кроссполяризационной развязки
Modeling and Practical Implementation of a Broadband Double-Ridged Horn Antenna with an Operating Range More Than an Octave and a High Level of Cross-Polarization Discrimination



Рис. 1. Многопозиционная микроволновая досмотровая система в месте эксплуатации

Fig. 1. Multiposition microwave inspection system (MMIS) at the place of operation

ческой задачей [8, 9]. Под КПП (Cross Polar Discrimination – CPD [10]) подразумевается минимальное отношение амплитуд линейных компонентов электромагнитного поля основной и кроссполяризации, определенных в системе координат Ludwig-3 [11], для заданного пространственного угла.

В разрабатываемой авторами настоящей статьи ММДС для построения микроволнового изображения используется апертурный синтез. Существенным ограничением для построения радиоизображения в ортогональной поляризации [1] является неудовлетворительное значение КПП используемой антенны.

При проведении эксперимента, описанного в [1], установлено минимальное значение КПП для задачи классификации опасных объектов на теле человека: 5.0 – в основной поляризации и 0.2 – в кроссполяризации, что составляет 28 дБ. Для разрабатываемой ММДС [12] необходимо, чтобы это значение выдерживалось при детектировании в зоне анализа отраженного излучения (рис. 2, 3).

Разрабатываемая многопозиционная система (рис. 2) состоит из двух антенных массивов, расположенных под углом 45° к оси X. Зона досмотра включает зону анализа прошедшего излучения 2 и зону анализа отраженного излучения 3 [13]. Из расположения и размеров зоны анализа отраженного излучения 3 следует, что требуемый пространственный угол, в котором должно выдерживаться заданное значение КПП, составляет как минимум 30° .

В первой версии ММДС [12] применялись печатные антенны Вивальди (рис. 3), но в процессе разработки системы для обнаружения скрытых объектов методом анализа кроссполяризационного рассеяния выявлено, что КПП данных антенн не удовлетворяет необходимым требованиям, так как ее уровень в угле 30° составляет всего лишь 4 дБ

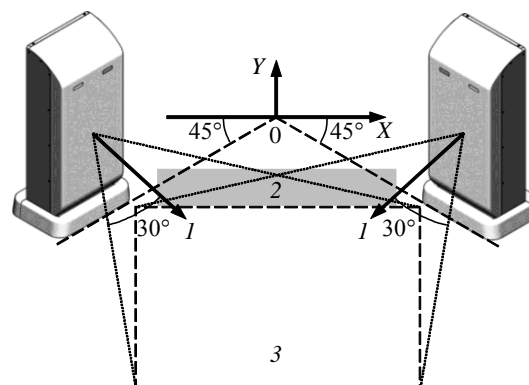


Рис. 2. Схема расположения ММДС:

1 – направление главных лепестков передающих антенн в массиве; 2 – зона анализа прошедшего излучения; 3 – зона анализа отраженного излучения

Fig. 2. MMIS location scheme:

1 – direction of the main lobes of the transmitting antennas in the array; 2 – zone of analysis of transmitted radiation; 3 – zone of analysis of reflected radiation

при линейно поляризованном излучении. В пространственном угле свыше 30° на частотах выше 14 ГГц у данной антенны начинает преобладать кросскомпонент и значение развязки падает до –10 дБ. Такие параметры не позволяют использовать данную антенну для определения скрытых опасных объектов, описанных в [1].

Остальные параметры антенны Вивальди в рабочем диапазоне 8...18 ГГц:

- коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) менее 1.8;
- среднее значение коэффициента направленного действия (КНД) 9 дБи;

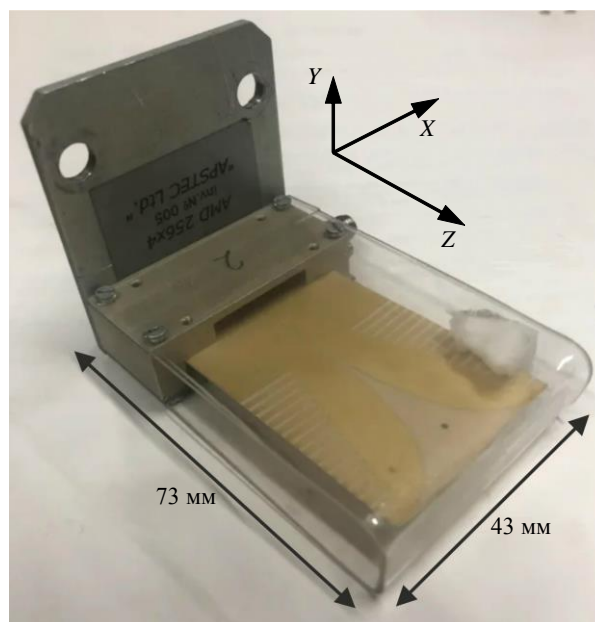


Рис. 3. Антенна Вивальди, используемая в ММДС

Fig. 3. Vivaldi antenna used in MMIS

– ширина главного лепестка по уровню 3 дБ в плоскости диэлектрической подложки xOz (E -плоскость) $70...60^\circ$, в ортогональной плоскости yOz (H -плоскость) $85...30^\circ$ в целом являются неудовлетворительными для систем с синтезом апертуры в пространственном угле 30° .

Помимо этого рассмотренная приемная антенна отличается хрупкостью и неустойчивостью конструкции, недостаточной повторяемостью электродинамических параметров от образца к образцу.

Цель работы. Разработка приемной антенны с высоким уровнем КПР, работающей в частотных диапазонах X и Ku , с помощью которой можно достоверно решить задачу восстановления радиоизображения в разрабатываемой ММДС для микроволнового излучения, деполаризованного при рассеянии скрытыми опасными объектами на теле человека.

В разрабатываемой приемной антенне должны быть достигнуты необходимые значения параметров, а также устранены отмеченные недостатки конструкции.

Методы исследования. Известны и применяются широкополосные структуры, разработанные на базе двухгребневых рупорных антенн [4, 5]. В [4] рассмотрен двухгребневый пирамидальный рупор, запитанный с помощью коаксиального кабеля, приведены размеры структуры и полученные для нее электродинамические параметры, но не указан уровень КПР. Для оценки этого параметра проведено электродинамическое моделирование двухгребневого пирамидального рупора с помощью CST STUDIO SUITE. Также с целью определения КПР в пространственном угле 30° промоделированы двухгребневые конический рупор и эллиптический волновод.

Для согласования антенн использовалась двухгребневая структура экспоненциальной формы

(рис. 4), заданная выражением

$$d(z) = y_1 + (y_2 - y_1) \frac{1 - e^{\alpha z}}{1 - e^{\alpha h}}, \quad (1)$$

где y_1, y_2 – координаты начала и конца экспоненциальной части двухгребневой структуры; α – коэффициент экспоненты; h – длина рупора. Двухгребневые структуры рассмотренных антенн запитывались коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом.

Проведем оценку размеров раскрыва для пирамидального рупора. Согласно [14] H -образный волновод, формируемый двумя гребнями в прямоугольном волноводе, имеет более низкую критическую частоту для волны основного типа H_{10} в сравнении с прямоугольным волноводом. Тип волны H_{10} также является основным для пирамидального рупора. Экспоненциальная форма гребней обеспечивает согласование H -образного волновода и раскрыва пирамидального рупора прямоугольной формы. Воспользуемся для оценки взаимосвязи размеров апертуры и коэффициента направленности формулой для волны H_{10} в пирамидальном рупоре [15]:

$$D = 0.64(4\pi ab/\lambda^2),$$

где a и b – поперечные размеры раскрыва.

Согласно [16] ширина диаграммы направленности (ДН) в E -плоскости yOz BW_E и H -плоскости xOz связана с размерами рупора соотношениями

$$a = 53\lambda/BW_E; \quad b = 53\lambda/BW_H.$$

Тогда требуемый КНД 10 дБи при средней частоте 13 ГГц для главного лепестка шириной 60° можно получить для размеров $a = 22$ мм и $b = 30$ мм.

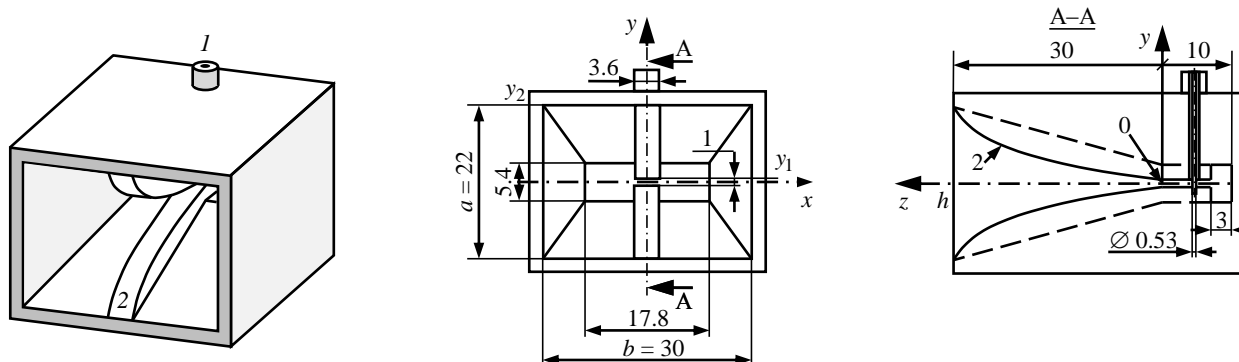


Рис. 4. Модель двухгребневого пирамидального рупора:

1 – 50-омный коаксиальный волновод с фторопластовым изолятором; 2 – металлический гребень экспоненциальной формы

Fig. 4. Double-ridged pyramidal horn model:

1 – 50-ohm coaxial waveguide with fluoroplastic insulator; 2 – exponential metal arris

В коническом рупоре благодаря двухгребневой структуре внутри раскрыва на выходе антенны (в сечении $\varnothing c$ на рис. 6) формируется волна типа H_{11} . Рассмотрим упрощенную модель излучения круглого волновода, возбужденного на волне H_{11} [15], для определения предельных размеров апертуры, необходимой для формирования коэффициента направленного действия, равного КНД ранее используемой антенны Вивальди. При ограничении размеров круглого волновода в пределах

$$c/\lambda = 0.6 \dots 1.3 \quad (2)$$

для КНД справедлива формула

$$D = (\pi c/\lambda)^2 \frac{(1 + \sqrt{1 - 1.154\lambda/c})^2}{4.775\sqrt{1 - 1.54\lambda/c}}, \quad (3)$$

где c – диаметр раскрыва рупора; λ – длина волны электромагнитного излучения. Таким образом, для средней частоты диапазона 13 ГГц и КНД 10 дБи необходимо иметь $c = 25$ мм.

Моделирование. На рис. 4 приведена анализируемая модель двухгребневого пирамидального рупора. Форма гребня 2 определена (1), при этом

размеры $a = 22$ мм и $b = 30$ мм выбраны для получения требуемого КНД в соответствии с (3).

Для этой модели получены частотные зависимости КСВН (рис. 5, б) и КПР в пространственном угле 30° (рис. 5, а) для различных значений коэффициента α . На приведенных графиках видно, что коэффициент α существенно влияет на уровень КПР, при этом КСВН для всех приведенных значений α не превосходит 2. Оптимальным для данной задачи является значение $\alpha = -0.1$, однако полученный при этом значении уровень КПР не менее 18 дБ не удовлетворяет заявленному требованию 28 дБ, а погрешности производства еще больше ухудшат этот параметр.

Поэтому было принято решение исследовать конический рупор. На рис. 6 приведена исследуемая модель конической двухгребневой рупорной антенны, состоящая из двух частей: самого рупора с апертурой диаметром c и круглого волновода радиусом 8 мм. Гребневая структура имеет экспоненциальную форму ребер $d(z)$, заданную (1). Для улучшения согласования гребни скошены со стороны короткозамыкающей стенки.

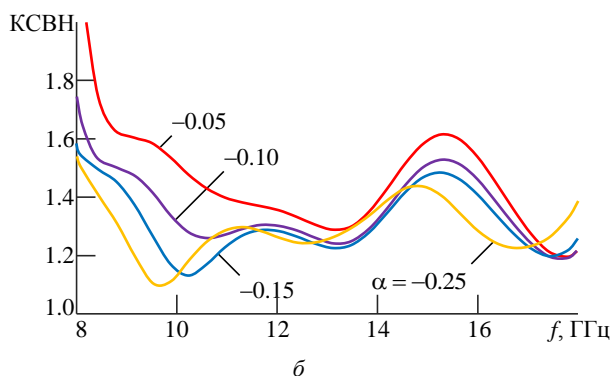
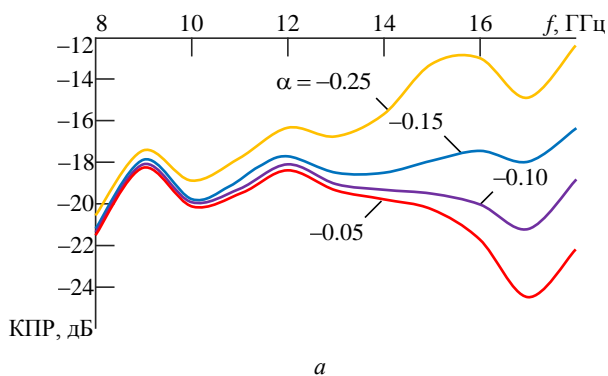


Рис. 5. Частотные зависимости параметров пирамидального рупора: а – КПР; б – КСВН в пространственном угле 30°

Fig. 5. Frequency dependences of the parameters of the pyramidal horn:
а – cross-polarization discrimination (CPR); б – VSWR in a spatial angle of 30°

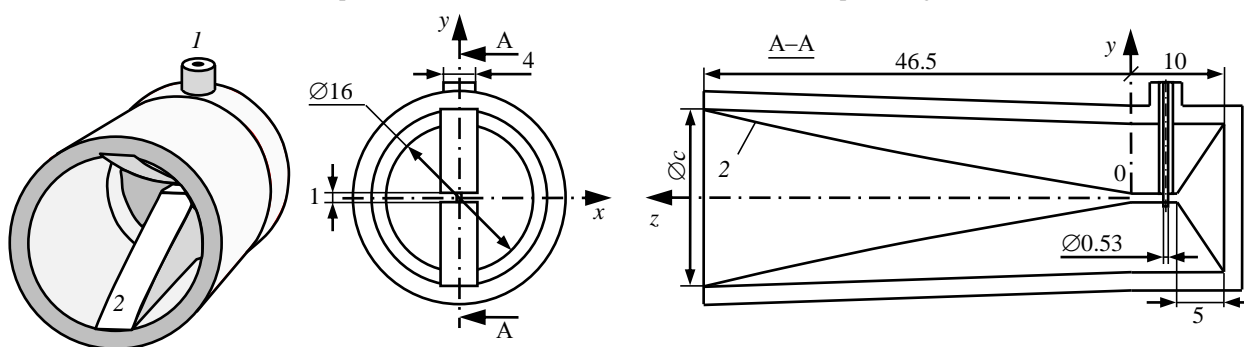


Рис. 6. Модель двухгребневого конического рупора:

1 – 50-омный коаксиальный волновод с фторопластовым изолятором; 2 – металлический гребень экспоненциальной формы

Fig. 6. Double-ridged cone horn model:

1 – 50-ohm coaxial waveguide with fluoroplastic insulator; 2 – exponential metal arris

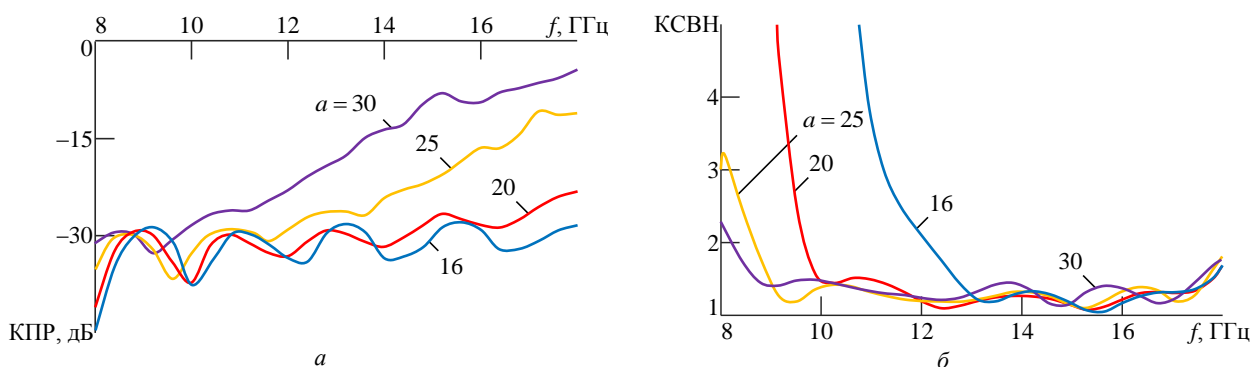


Рис. 7. Частотные зависимости параметров конического рупора: а – КПР в пространственном угле 30°; б – КСВН

Fig. 7. Frequency dependences of the parameters of the conic horn: а – CPR in a spatial angle of 30°; б – VSWR

Согласно ограничениям, установленным (2), рассчитаны значения КСВН и КПР в пространственном угле 30° для диаметра рупора 16, 20, 25 и 30 мм (рис. 7).

Согласно результатам моделирования, модель двухгребневой конической антенны имеет КСВН не более 2 в области верхних частот и КПР не менее 25 дБ в полосе частот с перекрытием по диапазону, равным 1.8. КНД на частоте 13 ГГц для раскрыва $c = 25$ мм соответствует значению 10 дБи, рассчитанному по (3). При этом на зависимости КПР от частоты (рис. 7, а) видно, что при диаметре раскрыва более 20 мм она существенно ухудшается. Это происходит из-за расфазировки конического рупора: при больших значениях диаметра раскрыва фазовое распределение в апертуре антенны будет отлично от равномерного, т. е. несинфазное. Исходя из приведенных на рис. 7 результатов, необходимый уровень КПР в пространственном угле 30° достигается при уменьшении размера апертуры до 16 мм. Необходимо отметить, что приближение апертуры к размеру круглого волновода невозможно, так как в этом случае увеличивается минимальная рабочая частота антенны.

Требуемые электродинамические и конструктивные параметры также возможно получить в двух-

гребневой антенне, разработанной на базе волновода эллиптического сечения. Эллиптическая форма волновода устраняет вырождение типа волны H_{11} , характерное для круглого волновода, и обеспечивает фиксацию плоскости поляризации [17].

Авторами сделано предположение, что расположение гребней вдоль малой оси эллиптического волновода улучшит значение КПР в пространственном угле 30°. На рис. 8 приведена 3D-модель эллиптической двухгребневой антенны (1 – 50-омный коаксиальный кабель с фторопластовым изолятором, оканчивающийся SMA-разъемом).

На рис. 9, 10 показаны частотные зависимости КСВН, КПР в пространственном угле 30°, ширина ДН в E - и H -плоскостях BW_E и BW_H , а также КНД. Приведенные результаты получены при следующих размерах эллиптической антенны:

- поперечные размеры эллиптического волновода в плоскости раскрыва $a_{эл} \times b_{эл} = 11 \times 7$ мм², где $a_{эл}$ и $b_{эл}$ – большая и малая полуоси эллипса соответственно;

- толщина гребня 3.4 мм;
- ширина щели в месте запитки 1 мм;
- длина антенны 68 мм.

Коническая внешняя форма антенны снижает

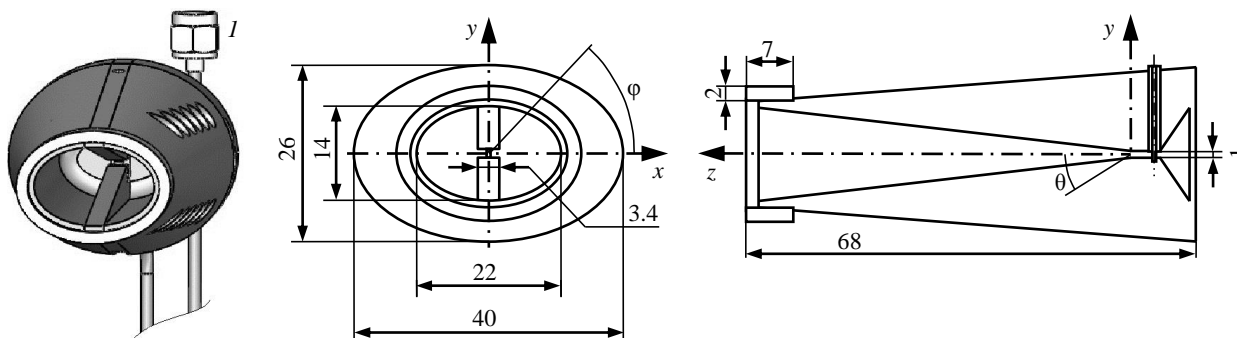


Рис. 8. Модель эллиптической двухгребневой антенны: 1 – 50-омный коаксиальный волновод с фторопластовым изолятором

Fig. 8. Model of an elliptical double-ridged antenna: 1 – 50-ohm coaxial waveguide with fluoroplastic insulator

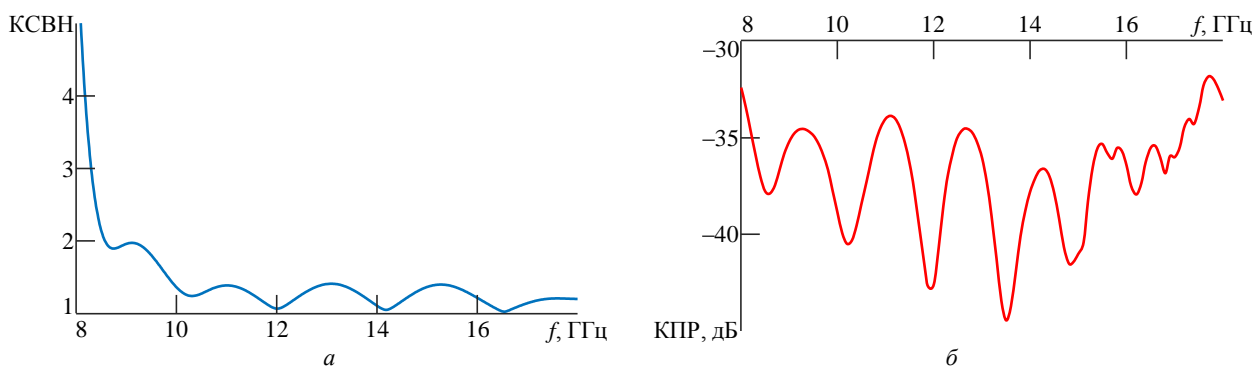


Рис. 9. Частотные зависимости параметров эллиптической двухгребневой антенны: а – КСВН; б – КПР в пространственном угле 30°
Fig. 9. Frequency dependences of the parameters of the an elliptical double-rib antenna: а – VSWR; б – CPR in a spatial angle of 30°

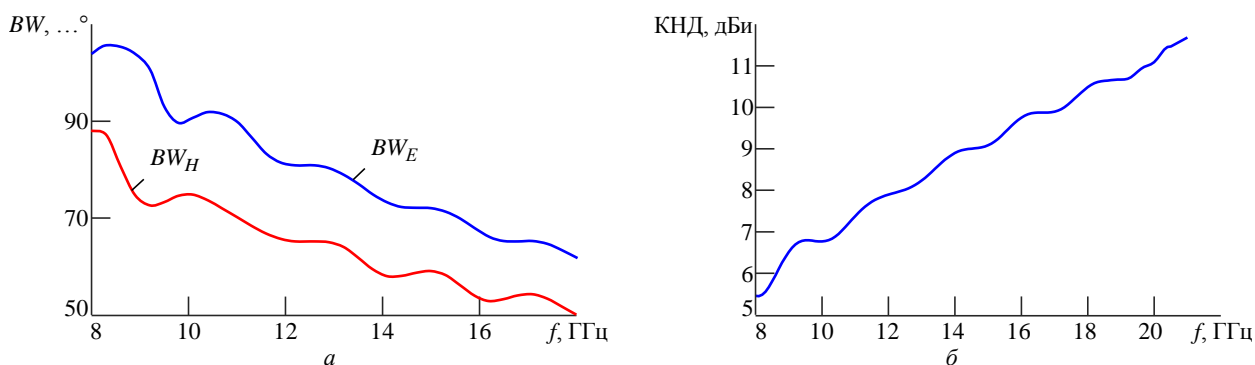


Рис. 10. Частотные зависимости параметров эллиптической двухгребневой антенны: а – ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ в E - и H -плоскостях; б – КНД

Fig. 10. Frequency dependences of the parameters of the an elliptical double-rib antenna: а – beam width in level -3 dB in E -plane and H -plane; б – directional coefficient

уровень приема ее апертурой посторонних излучений по сравнению с антенной цилиндрической формы. Увеличение размера на правом торце антенны добавило жесткости и устойчивости всей конструкции.

В плоскости раскрыва антенны находится небольшое фторопластовое кольцо, которое согласно результатам моделирования позволяет значительно снизить уровень кроссполаризационного излучения в нижней части диапазона частот.

Моделирование эллиптической двухгребневой антенны дало следующие ее параметры:

- $\text{КСВН} \leq 2$;
- КПР в пространственном угле 30° не менее 30 дБ в диапазоне частот с перекрытием 2.2;
- ширина главного лепестка и КНД удовлетворяют необходимым требованиям для обеспечения приема сигнала от цели в зоне анализа отраженного микроволнового излучения (см. рис. 2, 3).

Результаты. На рис. 11, а показан макет изготовленной двухгребневой эллиптической антенны. Результаты исследования ее электродинамических параметров в плоскости, задаваемой углом φ (см. рис. 8, б), приведены на рис. 12. Распределение КПР построено в зависимости от угла отклонения θ от оси симметрии антенны (см. рис. 8, в).

Для сохранения уровня КПР при формировании ансамбля приемных эллиптических двухгребневых антенн необходимо использование поглощающего материала, например ECCOSORB VHP-2-NRL. На рис. 11, б представлена фотография антенны в массиве поглотителя ECCOSORB VHP-2 в безэховой камере, где были проведены измерения [18]. Анализ результатов экспериментальных исследований разработанной и изготов-

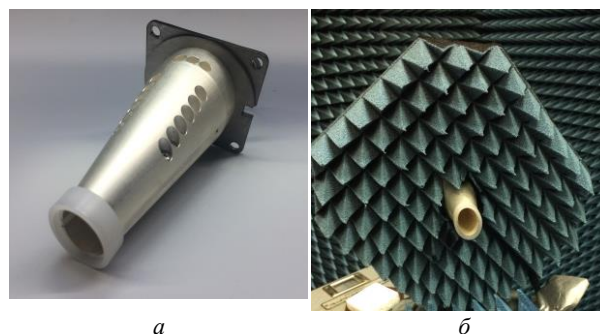


Рис. 11. Эллиптическая двухгребневая антенна: а – макет; б – установка в массив поглотителя ECCOSORB VHP-2-NRL

Fig. 11. Elliptical double-rib antenna: а – layout; б – installation in the array of the absorber ECCOSORB VHP-2-NRL

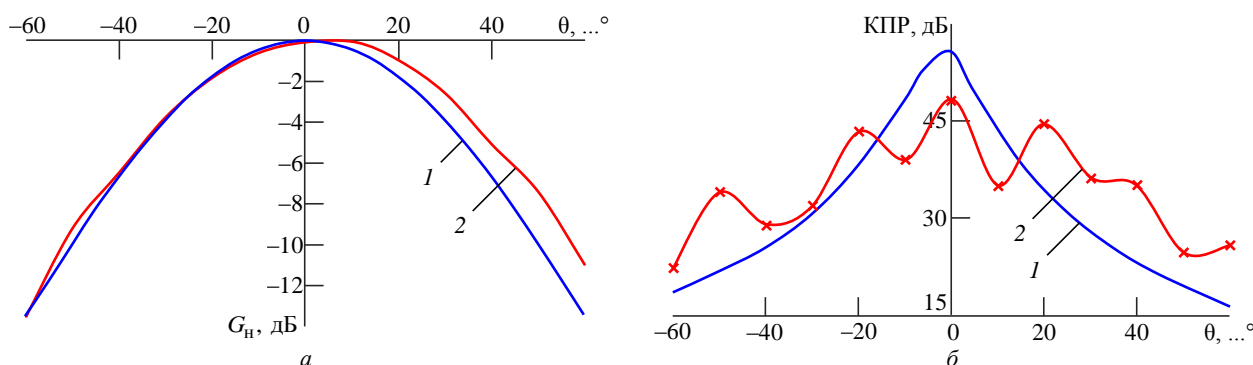


Рис. 12. Теоретические 1 и экспериментальные 2 зависимости параметров эллиптической двухгребневой антенны на частоте 18 ГГц в плоскости $\varphi = 45^\circ$:

a – нормированный на максимальное значение коэффициент усиления; b – КПП

Fig. 12. Theoretical 1 and experimental 2 dependences of the parameters of an elliptical double-rib antenna at a frequency of 18 GHz in the plane $\varphi = 45^\circ$: a – normalized to maximum value gain; b – CPR

ленной эллиптической двухгребневой антенны показывает, что полученные экспериментальные данные и результаты моделирования хорошо коррелированы. Значение КПП изготовленной антенны на частоте 18 ГГц в пространственном угле 30° не менее 30 дБ, при понижении частоты уровень развязки увеличивается. Это полностью согласуется с результатами моделирования и позволяет применять антенны в ММДС.

Заключение. Разработана и изготовлена двухгребневая эллиптическая антенна жесткой конструкции, с КСВН ≤ 2 и КПП в пространственном угле 30° не менее 28 дБ в диапазоне частот, пере-

крывающем октаву. Антенна может быть использована в ММДС для детектирования эффекта деполяризации микроволнового излучения скрытыми опасными объектами на теле человека. Конструктивно двухгребневая антенна собирается из трех частей – верхней и нижней половин эллиптического волновода и двухгребневой пластины, которые соединяются в одно целое с помощью винтов. Такая конструкция обеспечивает удовлетворение жестких конструктивных допусков, задаваемых моделированием, однако при изготовлении требует высокой культуры производства.

Список литературы

1. Григорьев А. Д., Мещеряков В. В., Семенов С. Н. Исследование эффекта изменения поляризации микроволнового излучения скрытыми объектами на теле человека // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 6. С. 41–45.
2. Cameron W. L., Youssef N. N., Leung L. K. Simulated Polarimetric Signatures of Primitive Geometrical Shapes // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34, № 3. P. 793–803. doi: 10.1109/36.499784
3. Touzi R., Charbonneau F. Characterization of Target Symmetric Scattering Using Polarimetric SARs // IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40, № 11. P. 2507–2516. doi: 10.1109/TGRS.2002.805070
4. Design and Implementation of 0.7 to 7 GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna / H. Fallahi, M. Kaboli, S. A. Mirtaheri, A. Mehrdadian // 7th Intern. Symp. on Telecommunications (IST'2014). Tehran, Iran, 9–11 Sept. 2014, Piscataway: IEEE, 2014. P. 250–255. doi: 10.1109/ISTEL.2014.7000707
5. Paez C. I., Criollo E. H. Improved Broadband Double Ridged Horn Antenna without Split Radiation Pattern // IEEE Latin America Trans. 2016. Vol. 14, iss. 3. P. 1156–1161. doi: 10.1109/TLA.2016.7459593
6. Migliaccio M., Gambardella A., Tranfaglia M. SAR Polarimetry to Observe Oil Spills // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45, iss. 2. P. 506–511. doi: 10.1109/TGRS.2006.888097
7. Martorella M., Berizzi F., Bruscoli S. Use of Genetic Algorithms for Contrast Maximization and Entropy Minimization in ISAR Autofocusing // EURASIP J. on Applied Signal Processing. Vol. 2006. Article ID 87298. P. 1–11. doi: 10.1155/ASP/2006/87298
8. Jacobs O. B., Odendaal J. W., Joubert J. Elliptically Shaped Quad-Ridge Horn Antennas as Feed for a Reflector // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2011. Vol. 10. P. 756–759. doi: 10.1109/LAWP.2011.2163050
9. Broadband Dual-Polarization Microstrip Antenna with High Cross-Polarization Isolation for SAR / Y. Ma, J. Hu, Y. Zhang, L. Li, L. Liu // 2018 China Intern. SAR Symp. (CISS). Shanghai, China, 10–12 Oct. 2018, Piscataway: IEEE, 2018. doi: 10.1109/SARS.2018.8551999
10. Stojce D. I. Global Mobile Satellite Communications Theory. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. 599 p. doi: 10.1007/978-3-319-39171-7
11. Ludwig A. The Definition of Cross Polarization // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1973. Vol. 21, iss. 1. P. 116–119. doi: 10.1109/TAP.1973.1140406

12. Многопозиционная система построения микроволнового изображения в режиме реального времени / С. И. Воробьев, В. П. Аверьянов, М. Ю. Осипов, С. Н. Семенов // Сб. статей 13-й Междунар. науч.-практ. конф. "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике". Санкт-Петербург, Россия, 24–26 мая 2012. С. 44–47.

13. Automatic standoff detection of threats in crowded areas / V. Averianov, A. Evsenin, I. Gorshkov, P. Iurmanov, A. Kuznetsov, G. Labzovsky, V. Meshcheryakov, M. Mokhova, S. Semenov, D. Vakhtin, I. Vorobev, S. Vorobyev, D. Kellermann // 9th Future Security. Security Research Conf. Proc., Berlin, Germany, 16–18 Sept. 2014. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014. P. 322–329.

14. Analysis of Elliptical Ridged Waveguide / J. Xu, W. Wang, Y. Gong, Y. Weiz // 2006 Joint 31st Intern. Conf. on Infrared Millimeter Waves and 14th Intern. Conf. on Terahertz Elec-

tronics. Shanghai, China, 18–22 Sept. 2006. doi: 10.1109/ICIMW.2006.368473

15. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ. Ч. 1. М.: Связь, 1977. 384 с.

16. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев; под ред. Д. И. Воскресенского. 2-е изд. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.

17. Tsogkas G. D., Roumeliotis J. A., Savaidis S. P. Cutoff Wavelengths of Elliptical Metallic Waveguides // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2009. Vol. 57, iss. 10. P. 2406–2415. doi: 10.1109/TMTT.2009.2029636

18. Nel M., Joubert J., Odendaal J. W. The Measurement of Complex Antenna Transfer Functions for Ultra-Wideband Antennas in a Compact Range // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2014. Vol. 56, iss. 6. P. 163–170. doi: 10.1109/MAP.2014.7011037

Информация об авторах

Мещеряков Виктор Владимирович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2013), старший инженер ООО "Апстек Лабс". Автор 18 научных работ. Сфера интересов – ВЧ-моделирование; алгоритмы радиовидения; прикладная физика; программирование ПЛИС и МК.

Адрес: ООО "Апстек Лабс", наб. Обводного канала, д. 199–201, корп. И, Санкт-Петербург, 190020, Россия

E-mail: mescheryakov.v.v@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4953-3671>

Маркова Наталья Владимировна – инженер по специальности "Радиофизика" (1975, Томский государственный университет), инженер ООО "Апстек Лабс". Сфера интересов – практическая электродинамика для антенных систем.

Адрес: ООО "Апстек Лабс", наб. Обводного канала, д. 199–201, корп. И, Санкт-Петербург, 190020, Россия

E-mail: nmarkova@apstelabs.com

Юрманов Павел Дмитриевич – магистр по направлению "Техническая физика" (2005), начальник производственного отдела ООО "Апстек Лабс". Автор трех научных публикаций. Сфера интересов – НЧ- и ВЧ-схемотехника; моделирование; разработка печатных плат.

Адрес: ООО "Апстек Лабс", наб. Обводного канала, д. 199–201, корп. И, Санкт-Петербург, 190020, Россия

E-mail: piurmanov@apstelabs.com

References

1. Grigoriev A. D., Meshcheryakov V. V., Semenov S. N. Investigation of polarization changing effect by hidden objects placed on a human body. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2015, no. 6, pp. 41–45. (In Russ.)

2. Cameron W. L., Youssef N. N., Leung L. K. Simulated Polarimetric Signatures of Primitive Geometrical Shapes. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1996, vol. 34, no. 3, pp. 793–803. doi: 10.1109/36.499784

3. Touzi R., Charbonneau F. Characterization of Target Symmetric Scattering Using Polarimetric SARs. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing. 2002, vol. 40, no. 11, pp. 2507–2516. doi: 10.1109/TGRS.2002.805070

4. Fallahi H., Kobo-li M., Mirtaheeri S. A., Mehrdadian A. Design and Implementation of 0.7 to 7 GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna. 7th Intern. Symp. on Telecommunications (IST'2014). 9–11 Sept. 2014, Tehran, Iran. Piscataway, IEEE, 2014, pp. 250–255. doi: 10.1109/ISTEL.2014.7000707

5. Paez C. I., Criollo E. H. Improved Broadband Double Ridged Horn Antenna without Split Radiation Pattern. IEEE Latin America Trans. 2016, vol. 14, iss. 3, pp. 1156–1161. doi: 10.1109/TLA.2016.7459593

6. Migliaccio M., Gambardella A., Tranfaglia M. SAR Polarimetry to Observe Oil Spills. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2007, vol. 45, iss. 2, pp. 506–511. doi: 10.1109/TGRS.2006.888097

7. Martorella M., Berizzi F., Bruscoli S. Use of Genetic Algorithms for Contrast Maximization and Entropy Minimization in ISAR Autofocusing. EURASIP J. on Applied Signal Processing. Vol. 2006, article ID 87298, pp. 1–11. doi: 10.1155/ASP/2006/87298

8. Jacobs O. B., Odendaal J. W., Joubert J. Elliptically Shaped Quad-Ridge Horn Antennas as Feed for a Reflector. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2011, vol. 10, pp. 756–759. doi: 10.1109/LAWP.2011.2163050

9. Ma Y., Hu J., Zhang Y., Li L., Liu L. Broadband Dual-Polarization Microstrip Antenna with High Cross-Polarization Isolation for SAR. 2018 China Intern. SAR Symp. (CISS). Shanghai, China, 10–12 Oct. 2018. Piscataway, IEEE, 2018. doi: 10.1109/SARS.2018.8551999

10. Stojce D. I. Global Mobile Satellite Communications Theory. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017, 599 p. doi: 10.1007/978-3-319-39171-7

11. Ludwig A. The Definition of Cross Polarization. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1973, vol. 21, iss. 1, pp. 116–119. doi: 10.1109/TAP.1973.1140406

12. Vorobiev S. I., Averyanov V. P., Osipov M. Yu., Semenov S. N. Multi-Position System for Constructing a Microwave Image in Real Time. Collection of articles of the 13th intern. scien. and practical conf. “Fundamental and Applied Research, Development and Application of High Technologies in Industry and Economics”, St. Petersburg, Russia, May 24–26, 2012, pp. 44–47. (In Russ.)

13. Averianov V., Evsenin A., Gorshkov I., Iurmanov P., Kuznetsov A., Labzovsky G., Meshcheryakov V., Mokhova M., Semenov S., Vakhtin D., Vorobev I., Vorobyev S., Kellermann D. Automatic Standoff Detection of Threats in Crowded Areas. 9th Future Security. Security Research Conf. Proc., Berlin,

Germany, 16–18 Sept., 2014. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014, pp. 322–329.

14. Xu J., Wang W., Gong Y., Weiz Y. Analysis of Elliptical Ridged Waveguide. 2006 Joint 31st Intern. Conf. on Infrared Millimeter Waves and 14th Intern. Conf. on Terahertz Electronics. Shanghai, China, 18–22 Sept. 2006. doi: 10.1109/ICIMW.2006.368473

15. Aizenberg G. Z., Yampolsky V. G., Tereshin O. N. Antennas VHF. Pt. 1. Moscow, Svyaz', 1977, 384 p. (In Russ.)

16. Voskresenskii D. I., Gostyukhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. Microwave Devices and Antennas; ed. by D. I. Voskresenskii. 2nd ed. Moscow, *Radio-tekhnika*, 2006, 376 p. (In Russ.)

17. Tsogkas G. D., Roumeliotis J. A., Savaidis S. P. Cutoff Wavelengths of Elliptical Metallic Waveguides. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2009, vol. 57, iss. 10, pp. 2406–2415. doi: 10.1109/TMTT.2009.2029636

18. Nel M., Joubert J., Odendaal J. W. The Measurement of Complex Antenna Transfer Functions for Ultra-Wideband Antennas in a Compact Range, IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2014, vol. 56, iss. 6, pp. 163–170. doi: 10.1109/MAP.2014.7011037

Information about the authors

Viktor V. Meshcheriakov – Master Sci. (2013) on Electronics and Nanoelectronics, Senior Engineer in Apstec Labs LTD. The author of 18 scientific publications. Area of expertise: high frequency modeling; radio vision algorithms; applied physics; FPGA programming.

Address: Apstec Labs LTD, 199–201 Nab. Obvodnogo kanala, Saint Petersburg 190020, Russia

E-mail: meshcheryakov.v.v@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4953-3671>

Natalia V. Markova – Graduate Engineer on Radiophysics (1975, Tomsk State University), Engineer in Apstec Labs LTD. Area of expertise: practical electrodynamics for antenna systems.

Address: Apstec Labs LTD, 199–201 Nab. Obvodnogo kanala, Saint Petersburg 190020, Russia

E-mail: nmarkova@apstecclabs.com

Pavel D. Iurmanov – Master Sci. (2005) on Technical Physics, Head of Production in Apstec Labs LTD. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: LF and HF circuitry; modeling; development of printed circuit boards.

Address: Apstec Labs LTD, 199–201 Nab. Obvodnogo kanala, Saint Petersburg 190020, Russia

E-mail: piurmanov@apstecclabs.com