

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ

УДК 621.396.96

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ГЕОРАДАРНЫХ СИСТЕМ
КОНТРОЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

В.Д. Сахацкий, проф., д.т.н.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Предложена конструкция СШП антенны, которая обеспечивает согласование волновых сопротивлений антенны и различных видов дорожного полотна, что повышает дальность действия георадара. Результаты эксперимента подтвердили эффективность антенны.

Ключевые слова: СШП антенна, волновое сопротивление, георадар, контроль качества автомобильных дорог.

НАДШИРОКОСМУГОВИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ ДЛЯ ГЕОРАДАРНИХ СИСТЕМ
КОНТРОЛЮ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

В.Д. Сахацький, проф., д.т.н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Запропоновано конструкцію НШС антени, яка забезпечує узгодження хвильових опорів антени та різних видів дорожнього полотна, що підвищує дальність дії георадара. Результати експерименту підтвердили ефективність антени.

Ключові слова: НШС антена, хвильовий опір, георадар, контроль якості автомобільних доріг.

ULTRA-WIDEBAND TRANSMITTER FOR HIGHWAY GPR CONTROL
SYSTEMS

V. Sakhatskyi, Prof., Ph. D. (Eng.), Kharkiv National Automobile Highway University

Abstract. The design of UWB antenna that provides matching of antenna wave impedance and various types of road pavement, which increases the GPR range is offered. The experimental results confirmed the effectiveness of the antenna in question.

Key words: UWB antenna, characteristic impedance, ground penetrating radar, quality control of motor roads.

Введение

В последнее время для неразрушающего контроля состояния автомобильных дорог широко применяется метод георадиолокационного зондирования с помощью георадаров [1, 2]. Данный метод основан на явлении отражения электромагнитной волны от подповерхностных сред, на которых скачкообразно

изменяются электропроводность или диэлектрическая проницаемость. Георадары используются для решения двух основных задач [2]: промеры мощностей конструктивных слоев дорожной одежды; выявление дефектов и неоднородностей в грунтах основания дороги, подземных полостей и других дефектов, влияющих на стабильность и долговременность работы автодороги.

Для промеров конструктивных слоев дорожного покрытия обычно применяют антенны с центральными частотами 900 МГц и более. При высокоточных определениях мощности и числа слоев асфальтобетона применяют рупорные антенны с частотами 1,5 и 2 ГГц, которые обеспечивают точность промеров до 1 см. Получили развитие и более высокочастотные радары, имеющие верхнюю частоту до 40 ГГц, которые имеют глубину зондирования в единицы-десятки сантиметров и используются, в основном, для анализа состояния бетонных строительных конструкций.

Длительность зондирующего импульса определяет пространственную длину импульса и является фундаментальным параметром георадарного зондирования, определяющим глубину, разрешающую способность и величину мертвой зоны – размер области, внутри которой невозможно выделить объекты, порождающие вторичные волны.

Существенное увеличение разрешающей способности при контроле подповерхностных объектов достигается с помощью сверхширокополосной (СШП) видеоимпульсной георадиолокации [3].

В системах обнаружения объектов за поверхностью непрозрачной среды при расположении приемо-передающей антенны над этой средой возникает мощный отраженный от поверхности среды сигнал передатчика. Такое явление снижает эффективность измерительной системы в целом. Поэтому приемо-передающую антенну прикладывают непосредственно к поверхности среды. В этом случае возникает проблема согласования антенны со средой распространения радиоволн.

Анализ публикаций

В настоящее время во многих странах, таких как США, Япония, Канада и Швеция, разрабатываются и выпускаются различные модификации георадаров. Ведущими фирмами, занимающимися производством георадаров, являются «GSSI» (New Hampshire, США), «Sensor and Software Inc.» (Канада), «Ega Technology» (Великобритания) и «MALA» (Швеция), «Radar Systems» (Латвия), «OYO Corporation» (Япония), «Geozondas» (Литва) [1, 2].

Для проведения работ по обследованию дорожной одежды в России применяются георадары различных типами, в частности, «Око-2» с двумя типами антенных блоков. Первый тип – рупорные антенны (АБ-1700Р, АБ-400Р, АБ-1000Р), работающие с отрывом от поверхности дорожного покрытия; второй – антенные блоки (АБ-1700У, АБ-400, АБ-250).

Для измерения толщины верхних слоев дорожного покрытия (глубина исследований до 0,6 м) используются антенные блоки АБ-1700У, АБ-1700Р. Выбор этих антенных блоков обусловлен их высоким разрешением по вертикали и горизонтали – 3–5 см. Для измерения толщины дорожного полотна на глубинах до 3,0 м применяются антенные блоки АБ-700, АБ-400Р, АБ-1000Р. При необходимости получить информацию о геологическом строении под дорожным покрытием на глубинах более 3,0 м могут быть применены антенные блоки АБ-400, АБ-250.

Антенный блок АБ-1700Р имеет такие характеристики: центральная частота – 1700 МГц, работа с отрывом от поверхности до 20 см, возможность детального изучения приповерхностных слоев, глубина зондирования – 0,8 м, разрешающая способность 0,03 м, габариты – 205×165×135 (мм), масса – 0,8 кг, потребляемая мощность – 5,0 Вт.

Внешний вид антенного блока в рабочем положении показан на рис. 1.



Рис. 1. Подвеска АБ-1700Р на автомобиле

Антенный блок АБ-1700У (универсальный) имеет следующие характеристики: центральная частота – 1700 МГц, возможна работа как со встроенным, так и с внешним датчиком

перемещения, глубина зондирования – 1 м, разрешающая способность – 0,03 м, габариты – 205×165×135 (мм), масса – 0,8 кг, потребляемая мощность – 5,0 Вт.

Внешний вид антенного блока в рабочем положении показан на рис. 2.



Рис. 2. Антенный блок АБ-1700У

В [3] отмечается, что основную часть существующих СШП георадаров составляют одинаковые по принципу построения приборы. В них используется бистатическая антенная система, передающая часть которой излучает видеоимпульсы длительностью в единицы-доли наносекунды. Приемная антенна нагружена стробоскопическим преобразователем. Георадар содержит систему временной автоматической регулировки усиления и аналого-цифровой преобразователь, из выхода которого принятый сигнал поступает в компьютер, где происходит обработка и отображение радиолокационной информации.

Способность антенны излучать и принимать отраженные от объекта контроля СШП сигналы характеризуется коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН). Чем меньше значение КСВН в рабочем диапазоне частот, тем эффективнее антенна. По величине КСВН можно судить о том, насколько хорошо антенна по волновому сопротивлению согласована с приемопередающим трактом и с пространством, в которое она излучает.

Известны СШП-рупорные антенны [4, 5]. Они используются в качестве самостоятельных приемо-передающих антенн в высокочастотных георадарах, биорадиолокационных системах поиска людей в завалах и их обнаружения за непрозрачными стенами.

Достоинством таких антенн является высокая эффективность и направленность излучения (большой коэффициент усиления и коэффициент направленного действия).

К недостаткам антенн следует отнести большие габариты и несогласованность выходного сопротивления антенны с входным сопротивлением различных сред, в которых или за которыми расположен контролируемый объект, что снижает эффективность работы радиолокационной системы в целом.

Цель и постановка задачи

Целью работы является разработка и исследование ТЕМ-рупорной антенны для переносных СШП георадаров, которая могла бы использоваться при контроле различных видов дорог, обеспечивала бы максимальную передачу мощности излучения передающего устройства от антенны в зондируемую среду и тем самым увеличивала бы дальность действия георадара.

Сверхширокополосная ТЕМ-рупорная антенна

В [6] показано, что модуль коэффициента отражения от апертуры рупора для различных типов рупорных антенн определяется из уравнения

$$\Gamma = \frac{1 - \gamma/k}{1 + \gamma/k},$$

где $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число в среде распространения; $\gamma = 2\pi/\lambda_b$ – постоянная распространения в волноводе, поперечное сечение которого равно размерам апертуры рупора; λ – длина волны в среде распространения; λ_b – длина волны в волноводе.

Из уравнения следует, что коэффициент отражения $\Gamma = 0$ (рупор согласован со средой распространения волны) при условии $\lambda = \lambda_b$.

В то же время отражение от апертуры волновода с волновым сопротивлением W будет отсутствовать, если волновое сопротивление Z среды, которая примыкает к волноводу, удовлетворяет уравнению [7]

$$W = Z. \quad (1)$$

Рупорные антенны проектируются таким образом, чтобы размер апертуры антенны обеспечивал формирование в нем волны, максимально приближенной к плоской, что обеспечивает выполнение условия $\lambda = \lambda_b$ и

уравнения (1). Для плоской волны волновое сопротивление среды распространения волн [7]

$$Z = \sqrt{\mu_a / \varepsilon_a},$$

а для волновода, в котором распространяется плоская волна,

$$W = \sqrt{\mu_B / \varepsilon_B},$$

где μ_a и ε_a , μ_B и ε_B – магнитные и диэлектрические проницаемости соответственно среды распространения волны и вещества, которое заполняет волновод.

Поэтому можно считать, что для немагнитных сред и веществ уравнение (1) выполняется, если $\varepsilon_a = \varepsilon_B$.

Известно [8], что решетка из диэлектрических плоских пластин толщиной d и периодом расположения T , который намного меньше длины волны, падающей на решетку, при условии, что вектор E напряженности электрического поля лежит в плоскости пластин, может быть представлена как однородный диэлектрик с эффективной относительной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_{r\text{эф}} = \varepsilon_r / [\varepsilon_r - (\varepsilon_r - 1)d/T]. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что, установив в ТЕМ-рупорной антенне диэлектрическую решетку и меняя период расположения диэлектрических пластин, можно обеспечить согласование антенны с различными непрозрачными средами.

Если известна относительная диэлектрическая проницаемость непрозрачной среды $\varepsilon_{r\text{сп}}$, то для заданной толщины пластин d и их относительной диэлектрической проницаемости ε_r необходимый период расположения пластин T находится из уравнения

$$T = d \varepsilon_{r\text{сп}} (\varepsilon_r - 1) / \varepsilon_r (\varepsilon_{r\text{сп}} - 1).$$

Если диэлектрическая проницаемость среды не известна, то необходимый период T в рабочем диапазоне частот антенны находят по измеренному при различных значениях T минимальному значению КСВН в тракте питания антенны.

Конструкция предлагаемой антенны для СШП георадаров поясняется иллюстрациями на рис. 3–5: на рис. 3 изображен вид спереди, на рис. 4 – вид сверху, на рис. 5 – вид сбоку.

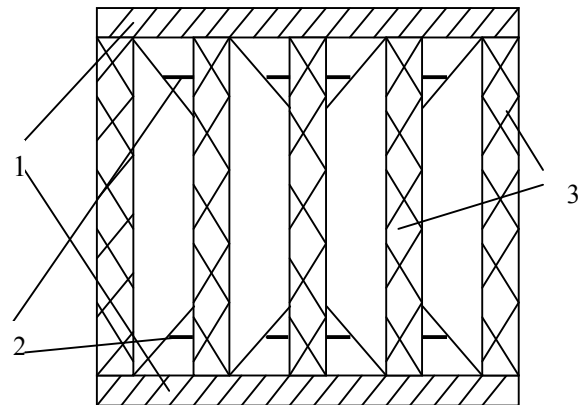


Рис. 3. Антенна (вид спереди)

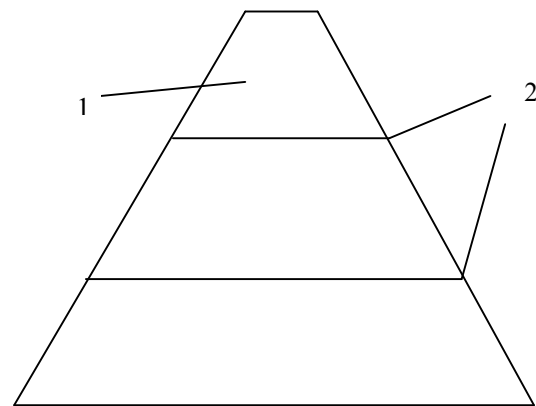


Рис. 4. Антенна (вид сверху)

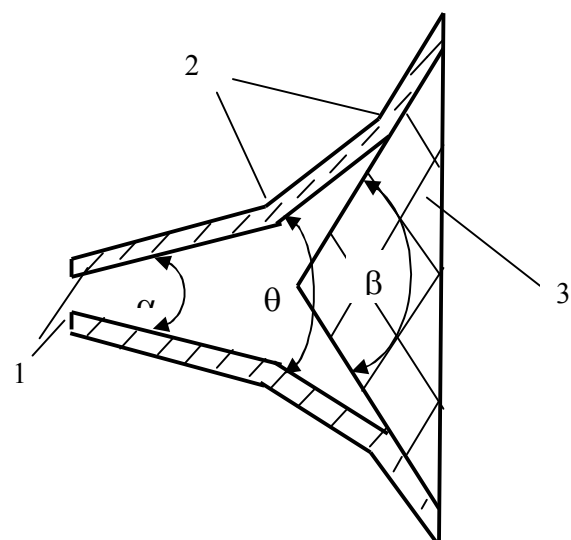


Рис. 5. Антенна (вид сбоку)

Сверхширокополосная ТЕМ-рупорная антенна представляет собой две металлические пластины 1 трапециевидальной формы. Основания трапеций лежат в плоскости апертуры

антенны, а вершины трапеций образуют горловину рупора. Плоскости пластин в горловине рупора расположены под углом α друг к другу. При определенном от горловины рупора расстоянии происходит скачкообразное увеличение угла между плоскостями пластин (излом образующей 2). Новый угол между плоскостями пластин θ становится больше угла α . Далее на определенном расстоянии от первого излома образующей происходит второй излом образующей; при этом новый угол между плоскостями пластин β становится больше угла θ .

Внутри рупора периодически с периодом

$$T < \lambda_{\min},$$

где λ_{\min} – минимальная длина волны рабочего диапазона антенны, устанавливаются параллельно боковым сторонам ТЕМ-рупора и его Е-плоскости пластины 3 из СВЧ-диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r и толщиной d . Плоскость пластин имеет форму равнобедренного треугольника с углом при вершине, равным β , и основанием, равным размерам апертуры ТЕМ-рупора в плоскости Е.

Антенна работает следующим образом: между металлическими пластинами 1 ТЕМ-рупорной антенны распространяется электромагнитная волна, которая по мере продвижения ее к апертуре антенны приближается к плоской волне. Изломы образующей 2 позволяют уменьшить высоту антенны. Диэлектрические пластины 3 треугольной формы обеспечивают концентрацию поля волны вдоль оси антенны, что позволяет увеличить коэффициент направленного действия антенны, а также плавное изменение волнового сопротивления рупора при распространении в нем волны таким образом, чтобы в области апертуры антенны это сопротивление было равно волновому сопротивлению среды дальнейшего распространения волны. При заданной толщине и диэлектрической проницаемости пластин согласование выходного сопротивления антенны и входного сопротивления какой-либо среды дальнейшего распространения волны обеспечивается за счет изменения периода расположения диэлектрических пластин.

В работе [10] приведены значения действительных и мнимых частей относительной

диэлектрической проницаемости для множества строительных материалов, различных видов грунта, льда, снега и других веществ. Анализируя приведенные данные, можно заметить, что для большинства материалов и веществ их мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости гораздо меньше действительной части. Для диапазона СВЧ ее значение $\epsilon_r < 5$. Поэтому использование в качестве диэлектрических пластин такого СВЧ диэлектрика как «Флан» обеспечивает возможность практического применения предложенной полезной модели для множества видов непрозрачных сред.

Крепление пластин к металлическим плоскостям ТЕМ-рупора можно осуществлять, например, с помощью болтов, выполненных из того же материала, что и диэлектрические пластины. Последние вкручиваются в пластину через отверстия в металлических плоскостях рупора. Определив, как указано выше, для различных сред место расположения диэлектрических пластин в рупоре и выполнив соответствующие для болтового соединения отверстия в металлических плоскостях ТЕМ-рупора, можно для конкретной на практике среды устанавливать в антенне необходимый период расположения пластин и обеспечить ее согласованный с зондируемой средой режим работы. При расчете геометрических размеров ТЕМ-рупорной антенны с изломами образующей в первом приближении можно воспользоваться методикой расчета, описанной в [11].

Эффективность работы предложенной полезной модели проверена экспериментально на лабораторном макете ТЕМ-рупорной антенны для неблагоприятного для практики случая, когда диэлектрическая пластина выполнена не из СВЧ-диэлектрика, а из органического стекла. В этом случае диэлектрик имеет высокое значение мнимой части диэлектрической проницаемости, что ухудшает согласование рупорной антенны с трактом ее питания от СВЧ-генератора.

Размеры апертуры и горловины макета ТЕМ-рупорной антенны в плоскости Е составляли 90 мм и 3 мм, а в плоскости Н – 135 мм и 5 мм соответственно. Угол $\alpha = 18^\circ$, угол $\theta = 25^\circ$ и угол $\beta = 35^\circ$, плоскости рупора были выполнены из меди. Общая высота антенны – 190 мм. Основание треугольной равнобедренной диэлектрической пластины было

равным 90 мм, угол при вершине треугольника соответствовал углу $\beta = 35^\circ$, ее толщина $d = 3$ мм. Антенна своей апертурой примыкала к стене лаборатории, в которой проводился эксперимент. Стена выполнена из красного кирпича и покрыта слоем штукатурки.

Степень согласованности антенны со стеной здания оценивалась по результатам измерения КСВН в коаксиальном тракте, по которому к антенне от генератора, который входил в комплект измерителя КСВН, подводилась энергия СВЧ. При измерениях использовался измеритель КСВН панорамный типа P2-58, рабочий диапазон которого – 3,2–5,64 ГГц. Исследуемая антенна включалась как нагрузка в схему измерителя КСВН. Горловина ТЕМ-рупорной антенны непосредственно соединялась с коаксиальным кабелем того же типа, что и кабели, которые входят в комплект измерителя P2-58. Поэтому измерение КСВН осуществлялось в согласованном с генератором СВЧ тракте питания антенны. В этом случае основными неоднородностями, которые влияли на КСВН, были области горловины ТЕМ-рупора и его апертуры.

Результаты измерений представлены на рис. 6. На рис. 6 (кривая 1) показана зависи-

мость КСВН от частоты генератора, когда апертура антенны лежала в плоскости стены и в антенне не было диэлектрических пластин.

Кривой 2 показана аналогичная зависимость, когда в антенне были установлены диэлектрические пластины с периодом расположения $T = 10$ мм.

Приведенные на рис. 6 кривые показывают, что при отсутствии в антенне диэлектрических пластин в диапазоне частот от $f_{\min} = 3,8$ ГГц до $f_{\max} = 4,4$ ГГц КСВН $\leq 2,2$, а при их наличии – КСВН $\leq 1,5$ в этом же диапазоне частот. Следует отметить, что КСВН $\leq 1,5$ является типичным для рабочего диапазона частот ТЕМ-рупорных антенн. Поскольку полоса частот антенны $\Delta f = (f_{\max} - f_{\min}) \geq 500$ МГц, то исследуемый лабораторный макет антенны соответствовал антеннам, которые пригодны для работы в СШП передающих устройствах [11].

Анализ полученных результатов измерения показывает, что неоднородность в горловине рупора в данном диапазоне частот не оказывает решающего влияния на КСВН, так как он изменяется только при установке в антенну диэлектрических пластин.

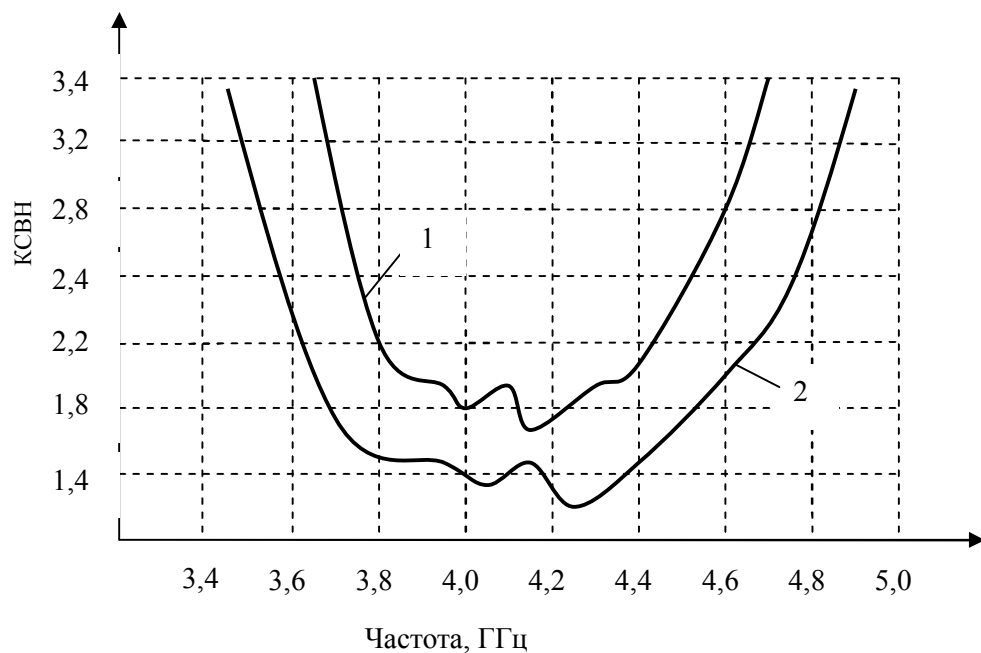


Рис. 6. Частотная зависимость КСВН антенны без диэлектрической решетки (1) и с диэлектрической решеткой (2)

Следует отметить, что рабочий диапазон антенны можно было бы увеличить за счет решения вопроса согласования входного сопротивления антенны в ее горловине с выходным сопротивлением тракта питания, но необходимости в этом не было, т.к. эффективность использования диэлектрических пластин была наглядно продемонстрирована и в указанном выше диапазоне частот.

Выводы

На основании проведенного эксперимента можно сделать вывод, что предложенная антенна действительно обеспечивает ее согласование с непрозрачной средой. Это выражается в уменьшении КСВН в тракте питания антенны вследствие уменьшения мощности отраженного от поверхности среды излучения. Уменьшение КСВН обеспечивает увеличение той части мощности генератора, которая проходит в непрозрачную среду распространения волн, и позволяет увеличить дальность действия системы обнаружения объектов за поверхностью непрозрачной среды.

Литература

1. Кулижников А.М. Георадары в дорожном строительстве / А.М. Кулижников, М.А. Шабашева // Автомобильные дороги: обзорн. информ. – М.: Информавтодор. – 2000. – Вып 2. – 52 с.
2. Жилин С.Н. Современные автоматизированные технические средства диагностики автомобильных дорог / С.Н. Жилин, В.И. Ермолаев // Автомобильные дороги: обзорн. информ. – М.: Информавтодор. – 2002. – Вып 5. – 60 с.
3. Масалов С.А. Проблемы и пути развития сверхширокополосной видеоимпульсной георадиолокации / С.А. Масалов, Г.П. Почанин // Радиофизика и электроника. – 2005. – Т. 10. – С. 633–640.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации: монография / под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
5. Абрамов А.В. Биорадиолокация: монография / А.В. Абрамов; под ред. А.С. Бугаева, С.И. Ивашова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 396 с.
6. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Сов. радио, 1972. – 320 с.
7. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов. – М.: Сов. радио, 1971. – 664 с.
8. Стоянов С.В. Эффективные параметры квазидиэлектриков / С.В. Стоянов, В.А. Шевченко // Радиотехника и электроника. – 1987. – Т. 32, № 9. – С. 1973–1976.
9. Вязьмитинов И.А. Результаты исследований ослабления энергии электромагнитных волн оптически непрозрачными преградами / И.А. Вязьмитинов, Е.И. Мирошниченко, О.В. Сытник // Радиофизика и электроника. – 2007. – № 2. – С. 426–434.
10. Тимофеева Н.А. Рупорная антенна с изломом образующей / Н.А. Тимофеева // Радиотехника. – 1975. – № 9. – С. 33–39.
11. Иммореев И. Сверхширокополосные и узкополосные системы связи. Совместная работа в общей полосе частот / И. Иммореев, А. Судаков // Электроника, Наука, Технология, Бизнес. – 2003. – №2. – С. 34–37.

Рецензент: О.Я. Никонов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 26 октября 2015 г.