

5. Fedorov N. N. *Osnovy elektrodinamiki* [Fundamentals of Electrodynamics]. Moscow, *Vyssshaya shkola*, 1980, 399 p. (In Russian)

6. Vytovtov K., Gnatushenko V., Zouhdi S. Terahertz Range Double Direction Isolator Based on Stratified Antiferromagnetic–Dielectric Structures. Theoretical Investigation. *Elektronika*, 2015, vol. 2, pp. 75–78.

7. Vytovtov K., Zouhdi S., Dubrovka R., Hnatushenko V. The Terahertz Controlled Duplex Isolator: Physical

Grounds and Numerical Experiment. *Int. J. of Microwave Science and Technology*, Hindawi Publishing Corporation, 2016, vol. 2016, ID 1468508, 7 p.

8. Barabanov I. O., Maltseva N. S., Barabanova E. A. Switching Cell for Information Transmission Optical Systems. *Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016)*, Conf. Proc., pp. 343–347.

Received January, 13, 2017

For citation: Vytovtov K. A. Penetration effect of an uniaxial anisotropic medium with magnetic anisotropy. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 2, pp. 33–39. (In Russian)

Konstantin A. Vytovtov – Ph.D. in Physics and Mathematics (2003), Associate Professor (2005), Associate Professor the Communication Department of Astrakhan State Technical University (Astrakhan). The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: anisotropic, bianisotropic materials; metamaterials; mathematical methods.

E-mail: vytovtov_konstan@mail.ru

УДК 621.396.677

Р. Ю. Бородулин

Военная академия связи

им. маршала Советского Союза С. М. Буденного (Санкт-Петербург)

Методы увеличения эффективности антенн, погруженных в диссипативные среды

Рассмотрены методы увеличения эффективности антенн, погруженных в грунт с различными электрическими параметрами. Приведены результаты численного анализа действующих длин, коэффициентов усиления и входных сопротивлений погруженных вибраторов различных конструкций. Представлены результаты сравнительного анализа эффективности работы цилиндрического и пластинчатого вибраторов. Раскрыты особенности построения пластинчатых вибраторов и их преимущества перед погруженными антеннами других типов.

Погруженная антенна, изолированный вибратор, пластинчатый вибратор, коэффициент усиления, входное сопротивление, действующая длина, эффективность антенны, многовибраторная синфазная система

Интерес к антеннам, размещенным на некоторой глубине в диссипативной среде (среде с потерями), довольно высок. Указанные антенны известны достаточно длительное время, их исследованию посвящены обширные монографии и технические отчеты отечественных и зарубежных специалистов [1]–[4] и др.

Применение погруженных антенн (ПА) на практике связано с рядом особенностей распространения радиоволн в диссипативных средах. Известны попытки использования указанных антенн для увеличения помехоустойчивости радиолиний, для радиосвязи в шахтах на большой глубине, в системах посадки самолетов, радио-

геологии, радиосвязи с заглубленными и погруженными объектами и т. п. [1]. Однако эффективность таких антенн остается довольно низкой по сравнению с антеннами, расположенными в воздушном пространстве, из-за влияния среды с потерями на их характеристики.

Исторически большинство исследований электрических характеристик и параметров ПА проводились экспериментально. Однако имеются примеры расчета таких антенн с использованием приближенной теории линий передач с потерями, которая получила существенное развитие во второй половине прошлого века. Например, проф. Б. В. Соуновым аналитически учтено влияние электри-

чески близко расположенной границы раздела двух сред ("воздух–среда с потерями") за счет оригинального решения задачи Зоммерфельда [5]. Полученные выражения стали основой для расчета изолированных и неизолированных ПА цилиндрического сечения. Однако проблема электродинамического анализа ПА произвольной формы осталась.

С появлением современных численных методов электродинамики, развитием основанных на них алгоритмов и программ встал вопрос о возможности расчета ПА указанными методами, хорошо зарекомендовавшими себя при расчетах антенн в свободном пространстве (воздух). Численные методы электродинамики позволяют моделировать излучатели произвольной формы. Найдены решения ряда задач по возможности моделирования подземных антенн методом конечных элементов (МКЭ) [6], [7] и методом конечных разностей во временной области (КРВО) [6], [8] с использованием искусственно вводимых поглощающих слоев, иначе называемых в литературе идеально-согласованными слоями (Perfectly Matched Layer – PML) [9]. Реализованная возможность применения для расчета ПА современных численных методов позволила начать работу по исследованию путей увеличения их эффективности без проведения трудоемких и дорогих экспериментов [10]. В настоящей статье представлены некоторые результаты этой работы, посвященные увеличению коэффициента полезного действия (КПД) ПА.

Для уменьшения влияния среды заложения ПА, увеличения КПД за счет уменьшения потерь известен способ, заключающийся в применении вибраторов с диэлектрическим покрытием. Обычно такие вибраторы изготавливаются из радиочастотных (коаксиальных) кабелей без внешних экранной и защитной оболочек. Для увеличения эффективности радиус диэлектрического покрытия (изоляции) вибратора b обычно берется много большим радиуса центрального проводника a . Для примера, возьмем $b = 3a$.

Известно, что вибраторы с диэлектрическим покрытием обладают большим коэффициентом усиления (КУ) по сравнению с неизолированными вибраторами цилиндрической формы, зависящим в том числе и от электрических параметров почвы [5]. В классе изолированных вибраторов (ИВ) существенный выигрыш по КУ может быть достигнут за счет изменения радиуса изоляции или радиуса самого проводника. Рассмотрим результаты расчета размеров ИВ при помощи метода, основанного на теории линий передач с потерями (ТЛПП) [5]. Вы-

яснилось, что для ИВ различных радиусов a фиксированной длины l действующие длины l_d в полосе частот не имеют существенных отличий вне зависимости от электрических параметров среды заложения. Для примера рассмотрим значения l_d в зависимости от частоты для влажной почвы с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 10$ и удельной проводимостью $\sigma = 10^{-2}$ См/м (рис. 1).

КУ (G) в зависимости от толщины вибраторов отличаются почти в 2 раза (рис. 2). Это вызвано в первую очередь разницей активных составляющих входных сопротивлений R_a . У более толстого вибратора (диаметр самого толстого вместе с изоляцией составляет $b = 0.344$ м) в сухой почве значение R_a ниже, что и приводит к такому эффекту.

Похожий эффект может быть достигнут при применении эквивалентных пластинчатых вибраторов. Преимуществом данного типа антенн является их малая толщина и простота изготовления. Эквивалентный цилиндрическому пластинчатый вибратор имеет длину, равную длине цилиндрического вибратора l и ширину пластины w , равную четырем радиусам a цилиндрического вибратора (рис. 3, $a = 0.25w$, $w \ll l$, $w \ll \lambda$).

Соотношение размеров пластинчатого и цилиндрического вибраторов, при которых их электрические характеристики эквивалентны в свободном пространстве, получены Батлером [11].

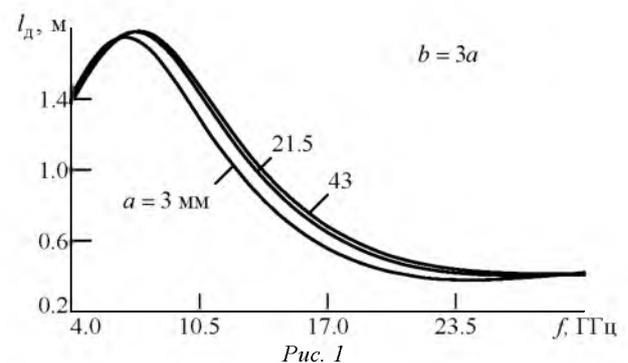


Рис. 1

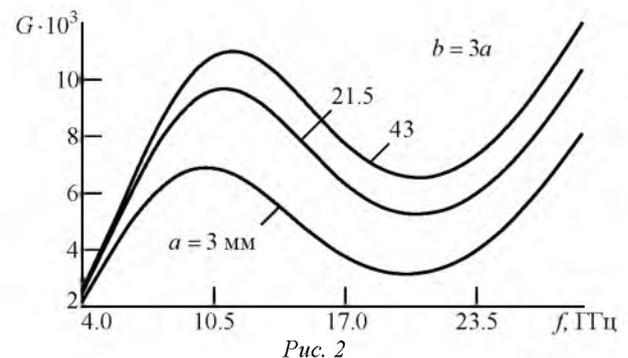


Рис. 2

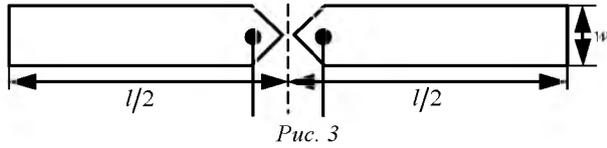


Рис. 3

Численные расчеты, проведенные современными методами, подтвердили, что практически идентичными оказываются диаграмма направленности (ДН), коэффициенты направленного действия и входные сопротивления в области первого (последовательного) резонанса. На других частотах входное сопротивление оказывается ниже приблизительно в 2 раза по сравнению с вибраторами цилиндрической формы. Однако все вышеизложенное справедливо для свободного пространства. Для диссипативных сред анализ эквивалентности пластинчатых и цилиндрических вибраторов не проводился.

Чтобы исправить данную ситуацию, был проведен численный эксперимент. В ходе проведенных численных тестов модель представляла собой погруженный на 0.5 м неизолированный вибратор длиной 5 м и радиусом $a = 0.043$ м. Эквивалентный ему пластинчатый вибратор имел ширину пластины $w = 0.172$ м. Вибраторы моделировались без изоляции во влажной почве с параметрами $\epsilon_r = 10$, $\sigma = 10^{-2}$ См/м при наличии границы раздела сред "воздух-земля".

Первый тест был проведен на основе модели подземной антенны, рассчитанной МКЭ. Сравнивались коэффициенты усиления G (рис. 4) и составляющие X_a , Y_a входных сопротивлений Z_a (рис. 5) цилиндрического (кривые 1) и пластинчатого (кривые 2) вибраторов.

Оказалось закономерным указанное Батлером практически полное совпадение КУ в диапазоне частот. В то же время составляющие входного сопротивления Z_a изменяются не так однозначно: в то время как реактивные составляющие X_a оказались примерно одинаковыми, активные со-

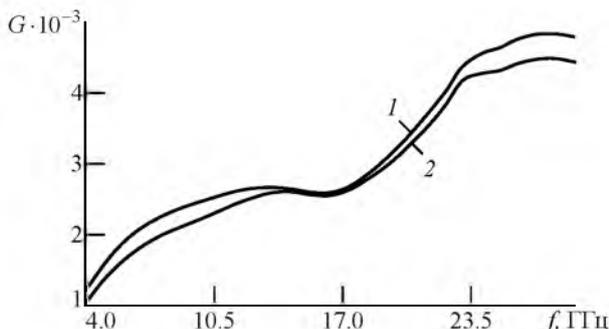


Рис. 4

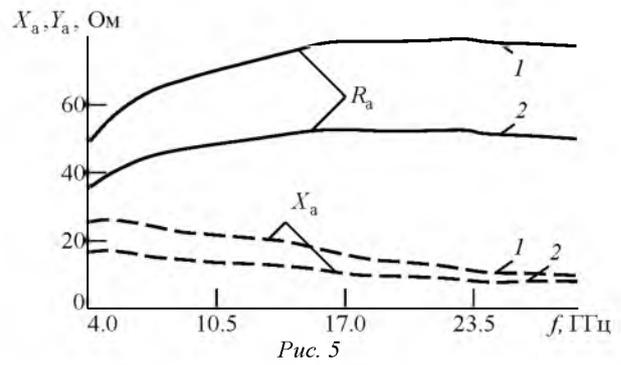


Рис. 5

ставляющие R_a , фактически определяющие сопротивление излучения, в отличие от свободного пространства различаются примерно в 1.5 раза (рис. 5). Таким образом, в диапазоне частот входные сопротивления не совпали, нарушив эквивалентность. Полученный факт можно объяснить тем, что цилиндрический вибратор, даже будучи погруженным в диссипативную среду, имеет более высокую добротность по сравнению с пластинчатым. Меньшая разница в значениях R_a (по сравнению с воздухом) говорит о влиянии проводимости диссипативной среды, в которую помещаются сравниваемые вибраторы (напомним, что в рассмотренном тесте обе антенны не изолированы от среды с потерями). Компенсация данной разницы в значениях КУ (рис. 4) косвенно говорит о большем КПД пластинчатого вибратора.

Для сравнения пластинчатых вибраторов с цилиндрическими ИВ был проделан следующий тест. Сравнивались (рис. 6) параметры тонкого ИВ ($a = 3$ мм, $b = 3a$, $l = 5$ м), рассчитанного по методу ТЛПП (сплошная кривая), с параметрами пластинчатого вибратора, форма которого аналогична рассмотренной ранее (рис. 3), рассчитанного МКЭ (штриховые кривые). Пластина имела размеры $w = 500$ мм и $l = 5$ и 6 м, помещалась во влажный грунт на глубину $h = 0.5$ м. Расчет произведен в декаметровом диапазоне.

Для влажной почвы в нижней части диапазона частот пластинчатые вибраторы указанной шири-

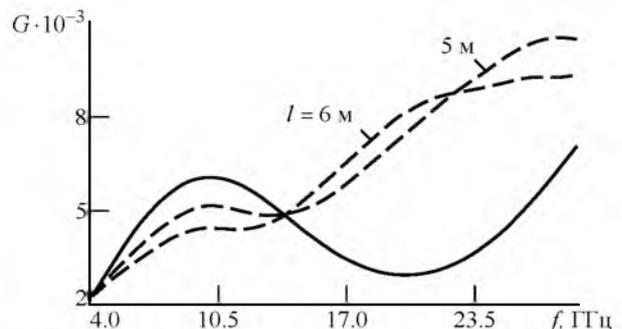


Рис. 6

ны несколько проигрывают цилиндрическому. Начиная примерно с середины диапазона (около 14 МГц) КУ пластинчатых вибраторов постепенно увеличиваются, в то время как цилиндрический вибратор показывает гораздо худшие результаты. Рассмотрим причины данного эффекта.

Для цилиндрического симметричного вибратора, ориентированного параллельно границе раздела (ось y), в соответствии с теоремой взаимности коэффициент усиления равен [12]:

$$G = \frac{120\pi^2 |I_d|^2}{\lambda^2 R_a} = \frac{120\pi^2 \left| \frac{E_{y2}}{E_0 I_a} \int_{-l}^l I(y) dy \right|^2}{\lambda^2 R_a}, \quad (1)$$

где $R_a = \text{Re}(Z_a)$ – действительная составляющая входного сопротивления; E_{y2} – амплитуда прошедшей в нижнее полупространство горизонтальной компоненты напряженности электрического поля; E_0 – амплитуда вектора падающей на границу раздела сред волны; I_a – ток в области возбуждения; l – длина вибратора; $I(y)$ – распределение тока по проводникам антенны в режиме передачи.

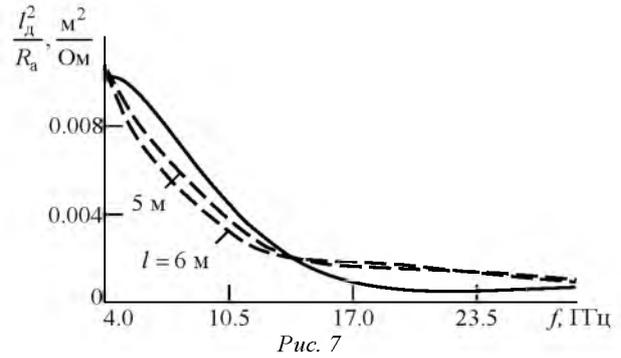
Для пластинчатого вибратора при достаточно малых площадях торцевых поверхностей справедливо приближенное равенство

$$G \approx \frac{120\pi^2 \left| \frac{E_{y2}}{E_0 I_a} \int_S \mathbf{J}_s dS \right|^2}{\lambda^2 R_a}, \quad (2)$$

где \mathbf{J}_s – плотность поверхностного тока, текущего по пластине площадью S .

Из анализа (1) и (2) следует, что рассматриваемые вибраторы можно характеризовать множителем I_d^2/R_a , описывающим площадь эффективной поверхности с постоянным распределением тока, отнесенную к 1 Ом активной составляющей входного сопротивления. Отмеченные ранее различия в КУ (см. рис. 6) можно объяснить разными значениями I_d^2/R_a , даже несмотря на то что полученные результаты не сильно отличаются для влажной почвы (рис. 7).

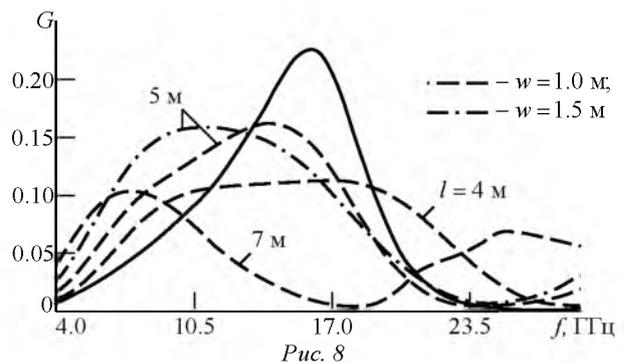
Для пластинчатых вибраторов указанное соотношение на частотах, превышающих 14 МГц, более выгодно (рис. 7), что объясняется меньшей зависимостью действующей длины и входного сопротивления от частоты. Слабая частотная за-



висимость действующей длины достигается гораздо меньшим взаимодействием противофазных токов в силу большой ширины пластины, в то время как для цилиндрического вибратора, хоть и в изоляции, противофазные токи находятся гораздо ближе. Увеличение ширины пластин приводит к еще большему уменьшению составляющих входного сопротивления (понижению добротности) при некотором увеличении действующей длины, что приводит к росту КУ.

При размещении антенны в сухой земле с параметрами $\epsilon_r=5$, $\sigma=10^{-3}$ См/м картина распределения КУ в диапазоне частот существенно меняется (рис. 8) (результат получен МКЭ). Для такого типа почвы изменением ширины либо длины пластинчатых вибраторов можно добиться более высоких показателей КУ в нижней части диапазона частот. В верхней части диапазона большие значения КУ имеют более длинные вибраторы (с длиной плеча 7 м), но стабильно широкую полосу по КУ все же дают короткие (с длиной плеча 4 м).

Увеличение ширины вибраторов при сохранении постоянной длины приводит к сдвигу полосы равномерного КУ в нижнюю часть диапазона. Для цилиндрического изолированного вибратора (рис. 8, сплошная кривая) более низкие потери в сухой земле по сравнению с влажной дают высокий пик КУ на частоте, близкой к резонансной, с



учетом коэффициента укорочения в земле. Однако коэффициенты усиления пластинчатых изолированных вибраторов более равномерны в широкой полосе частот.

Рассмотрим причины такой частотной зависимости КУ вибраторов в сухой почве в диапазоне частот на основании соотношения I_d^2/R_a (рис. 9).

Несмотря на то что равномерность величины I_d^2/R_a цилиндрического вибратора (рис. 9, сплошная кривая) в нижней части диапазона более высокая, пластинчатые вибраторы показывают существенно лучшие результаты, в том числе зависящие от их длины. Увеличение ширины пластин до 1.5 м расширяет зону равномерности этой величины.

Отмеченный факт говорит о том, что для сухих почв пластинчатые вибраторы с большими значениями параметра w обладают аналогичными или несколько большими максимальными значениями КУ по сравнению с изолированными цилиндрическими вибраторами. Наряду с этим, пластинчатые вибраторы имеют гораздо более широкую полосу равномерности КУ и согласованности по входному сопротивлению в рабочем диапазоне частот за счет существенного снижения добротности пластин.

Таким образом, для обеспечения высокой стабильности электрических характеристик в полосе рабочих частот ПА применение пластинчатых вибраторов более целесообразно. Данное утверждение касается сухих и влажных типов почв, а также промежуточных значений их электрических параметров. С уменьшением потерь в земле за счет снижения проводимости (влажности) резонансные свойства тонких цилиндрических вибраторов становятся более выраженными, что требует лучшего согласования с линиями

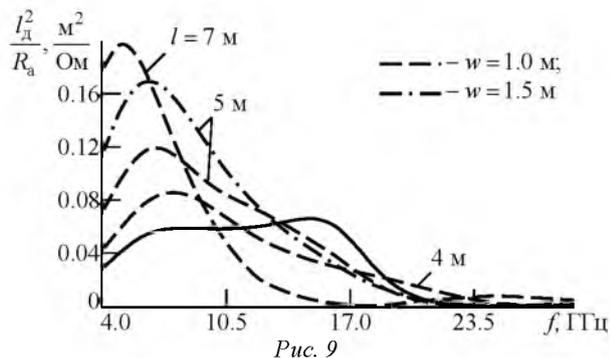


Рис. 9

питания. Частотная зависимость КУ таких антенн от их резонансной длины выражена в большей мере по сравнению с пластинчатыми вибраторами.

Рассмотрим возможности дальнейшего повышения эффективности пластинчатых вибраторов.

Устройство ПА в виде системы параллельно расположенных и синфазно питаемых линейных горизонтальных проводников является эффективным способом увеличения КУ [5]. Разветвление тока по многим проводникам приводит к уменьшению напряженности поля у их поверхности и, следовательно, к снижению потерь в окружающей проводящей среде. В отличие от многократных заземлений ПА в виде многовибраторной системы конструируется так, чтобы обеспечивалось максимальное излучение в верхнее полупространство. С этой целью вибраторы питаются синфазно и располагаются параллельно на таком расстоянии друг от друга, чтобы взаимное влияние между ними было малым.

Известно, что КУ синфазной системы антенн зависит от оптимального взаимного расположения входящих в нее элементов [5]. При этом может быть достигнут выигрыш, определяемый приближенным соотношением

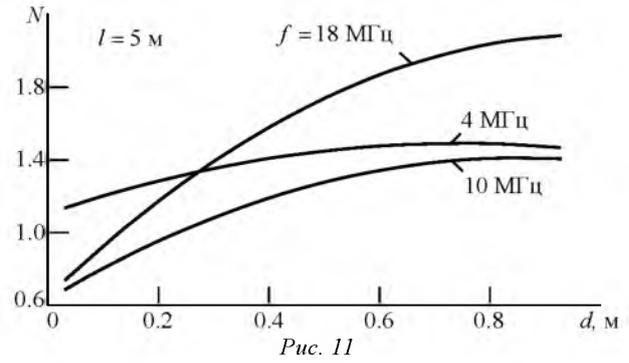
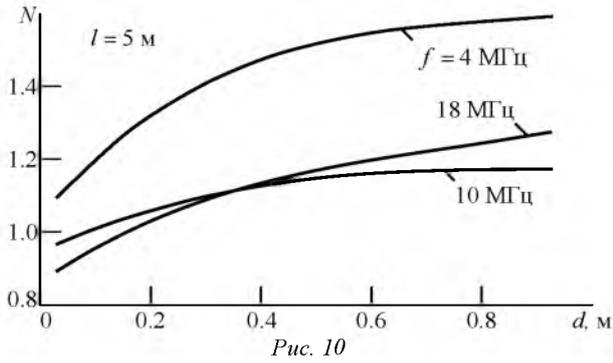
$$G_N \approx NG_1, \quad (3)$$

где G_N — КУ N -вибраторной антенны; G_1 — КУ одиночного вибратора в секции.

Выражение (3) является сильно приближенным, поскольку введено на основе только экспериментальных наблюдений, без учета частотной зависимости КУ, получаемого для различных расстояний между вибраторами при разных типах почв. Уточним его.

Для поиска оптимальных расстояний между вибраторами рассмотрена двухвибраторная синфазная система из изолированных цилиндрических вибраторов. Вибраторы моделировались МКЭ в среде с параметрами сухой почвы в диапазоне дециметровых волн. В результате проведенных расчетов получены зависимости параметра N от расстояний d между вибраторами (рис. 10).

Полученные зависимости справедливы для любых типов подземных вибраторов, в том числе и пластинчатых. Анализ графиков показывает, что в области низких частот выигрыш системы из двух вибраторов может быть достигнут для расстояний до 1 м. В средней части диапазона (10 МГц) значения становятся примерно постоянными начиная с 0.7 м.



Отмеченный факт говорит о том, что для пластинчатых вибраторов расстояние d определяет максимальное разнесение между фазовыми центрами пластин. Ширину таких антенных полотен целесообразно брать равной 1 м или, при необходимости, немного больше. Показанная ранее тенденция увеличения КУ пластинчатых вибраторов в нижней части диапазона рабочих частот (см. рис. 8) позволит сделать результирующий КУ многовибраторной системы, помещаемой в сухую почву, более высоким именно в этой части диапазона, достигается существенный энергетический выигрыш в сравнении с тонкими изолированными цилиндрическими вибраторами.

Для влажной почвы выигрыш по КУ имеет несколько иную тенденцию (рис. 11). С учетом увеличения КУ пластинчатых вибраторов, помещенных во влажную почву, в верхней части декаметрового диапазона волн (см. рис. 6) показан-

ный на графике выигрыш именно в данной части диапазона приведет к еще большему увеличению КУ пластин на верхних частотах.

Указанные преимущества систем пластинчатых вибраторов следуют и из анализа зависимостей на рис. 6, 8, поскольку указанные вибраторы можно аппроксимировать решеткой тонкопроволочных вибраторов с малыми электрическими расстояниями между ними. Такой подход позволяет описать, в частности, характерное увеличение КУ системы двух синфазных пластинчатых вибраторов во влажной почве в верхней части диапазона (рис. 11). Тем не менее, полная металлизация земли за счет сплошного металла пластин приводит к лучшим показателям эффективности ПА за счет более равномерного распределения токов.

Остается вопрос определения количества плоскостных вибраторов и их размещения в многовибраторной системе, поскольку при слишком большой

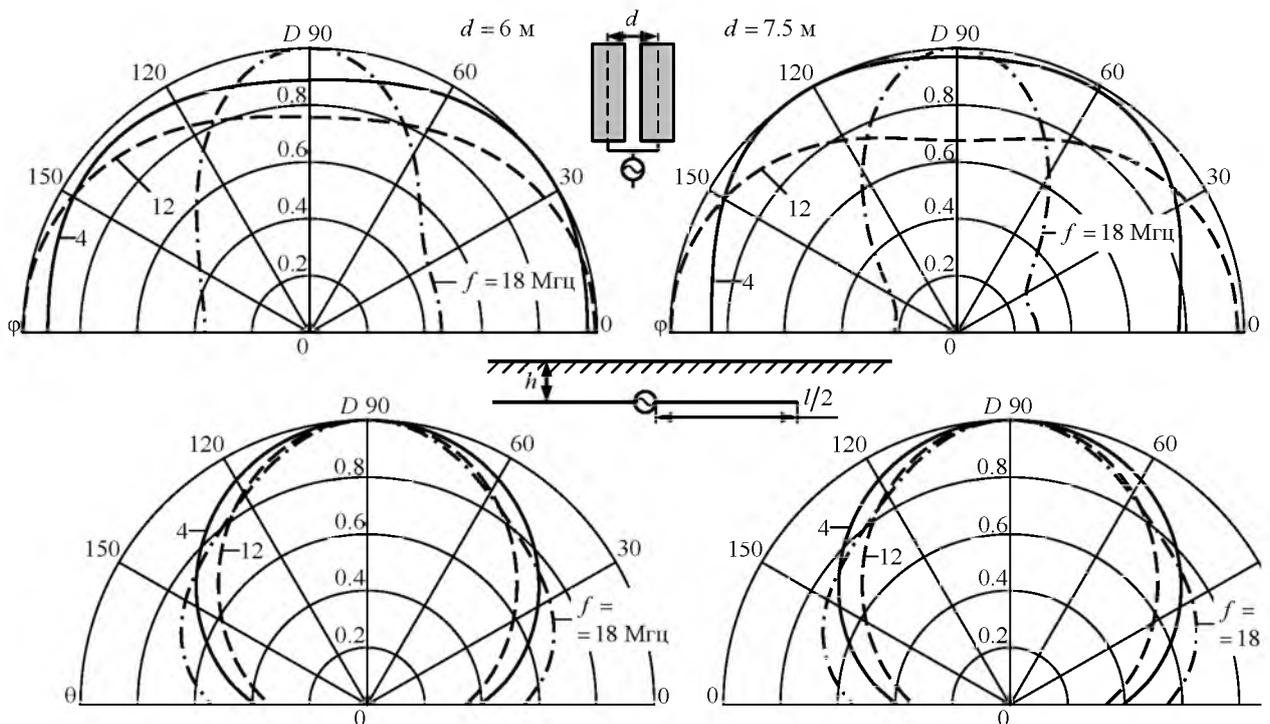


Рис. 12

ее ширине будет проявляться эффект синфазной антенной решетки, сужающий ДН в вертикальной плоскости, что может привести к резкому снижению дальности связи ионосферными волнами.

Для анализа степени проявления указанной проблемы проведен анализ ДН синфазной системы двух вибраторов для увеличенных расстояний: 6 и 7.5 м (рис. 12).

На представленных ДН видно их закономерное вытягивание в азимутальной плоскости вдоль оси вибраторов с повышением частоты. Однако в меридиональной плоскости (нижние графики) существенного сужения ДН не наблюдается, что говорит о возможности размещения в многовибраторной системе до 6–7 пластинчатых вибраторов шириной порядка 1 м каждый. В случае более широких одиночных пластин количество вибраторов должно быть уменьшено для сохранения общего габарита многовибраторной синфазной системы.

На основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что применение, например, трех многовибраторных синфазных си-

стем подземных пластинчатых вибраторов, погруженных в сухой грунт, позволит получить КУ, равный КУ мачтовой антенны горизонтальных вибраторов типа ВГД. При этом ПА может использоваться для радиолиний, использующих ионосферное распространение радиоволн. Она может иметь сопоставимый с мачтовыми антеннами КУ, не требуя регламентного обслуживания мачт. Площадь антенного поля будет значительной (порядка 21×10 м), но все преимущества такой антенны очевидны.

Таким образом, несмотря на низкую эффективность одиночных ПА, их применение в составе многовибраторной синфазной системы на оптимальных взаимных расстояниях может быть оправданно. Применение современных численных методов для анализа ПА раскрыло возможности повышения их эффективности, но необходимость в экспериментальных измерениях остается, поскольку для конкретного места заложения будут характерны свои электрические параметры диссипативных сред, точно измерить которые довольно проблематично.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавров Г. А., Князев А. С. Приземные и подземные антенны. Теория и практика антенн, размещенных вблизи поверхности земли. М.: Сов. радио, 1965. 474 с.
2. King R. W. P. Dipoles in Dissipative Media // *Electromagnetic Waves*; ed. by R. E. Langer. Madison: University of Wisconsin Press, 1962. P. 199–241.
3. Iizuka K., King R. W. P. An Experimental Study of the Properties of Antennas Immersed in Conducting Media, *Cruft Laboratory Scientific Report 2*, Harvard University, 1961. URL: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0273687> (дата обращения 28.03.2017).
4. Galleys J. *Antennas in Inhomogeneous Media*. Oxford: Pergamon Press Inc, 1969. 294 p.
5. Сосунов Б. В., Филиппов В. В. Основы расчета подземных антенн / ВАС. Л., 1990. 82 с.
6. Бородулин Р. Ю. Численные методы электродинамики / ВАС. СПб., 2016. 180 с.
7. Jin J. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 753 p.
8. Stutzman W. L., Thiele G. A. *Antenna Theory and Design*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2012. 848 p.
9. Berenger J. P. A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves // *J. Comp. Phys*. 1994. Vol. 114, № 2. P. 185–200.
10. Бородулин Р. Ю., Ключко Н. Ю. Методика расчета характеристик антенн, расположенных в полубесконечной среде с потерями, методом конечных элементов // *Информация и космос: науч.-техн. журн*. 2016. № 2. С. 41–44.
11. Batler C. M. The Equivalent Radius of a Narrow Conducting Strip // *IEEE Trans. Ant. & Prop*. 1982. Vol. AP-30, № 7. P. 755–758.
12. Антенны: в 2 т. Т. 1 / Н. П. Гавеля, А. Д. Истрашкин, Ю. К. Муравьев, В. П. Серков; под ред. Ю. К. Муравьева / ВКАС. Л., 1963. 142 с.

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2016 г.

Для цитирования: Бородулин Р. Ю. Методы увеличения эффективности антенн, погруженных в диссипативные среды // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2017. № 2. С. 39–46.

Бородулин Роман Юрьевич – кандидат технических наук (2010), докторант кафедры радиосвязи Военной академии связи им. маршала Советского Союза С. М. Буденного (Санкт-Петербург). Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – численные методы электродинамики; техническая электродинамика; антенно-фидерные устройства; распространение радиоволн.
E-mail: borodulroman@yandex.ru

R. Yu. Borodulin

Military Academy of Communication (Saint Petersburg)

Methods of Increasing Efficiency of Antennas Embedded in Dissipative Media

Abstract. The article considers the problem of increasing efficiency for antennas embedded in dissipative media that has limited number of solutions today. The author makes attempts to study the possibility of using plate antennas for different parameters of dissipative media. The research is carried out by means of analytical and computer electromagnetic methods. It makes possible to refine some effects and reveal new patterns. The article provides sound approaches to increase efficiency of antennas embedded in dissipative media. The results are confirmed with numerical calculations.

The article presents the methods of increasing efficiency of antennas embedded in soil with different electrical parameters. The results of numerical analysis of antenna length, gain and impedances for embedded antennas of various constructions are given. Comparative analysis of the efficiency of cylindrical and plate antennas is provided. Special considerations of plate antenna construction and their advantages over embedded antennas of different types are revealed.

Key words: Embedded Antenna, Isolated Dipoles, Plate Antenna, Gain, Impedance, Length of Antenna, Efficiency of Antenna, the System of Dipoles.

REFERENCES

1. Lavrov G. A., Knyazev A. S. *Prizemnye i podzemnye anteny. Teoriya i praktika antenn, razmeshchennykh vblizi poverkhnosti zemli* [Underground and ground antennas. Theory and practice of antennas placed near the surface of the Earth]. Moscow, *Sovetskoe Radio* Publ., 1965, 474 p. (In Russian)
2. King R. W. P. Dipoles in Dissipative Media. *Electromagnetic Waves*; ed. by R. E Langer. Madison, University of Wisconsin Press, 1962, pp. 199–241.
3. Iizuka K., King R. W. P. An Experimental Study of the Properties of Antennas Immersed in Conducting Media. Cruft Laboratory Scientific Report 2, Harvard University, 1961. Available at: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0273687> (accessed: 28.03.2017). (In Russian)
4. Galley J. Antennas in Inhomogeneous Media. Oxford, Pergamon Press Inc, 1969, 294 p.
5. Sosunov B. V., Filippov V. V. *Osnovy rascheta podzemnykh antenn* [Underground antenna calculating basis]. L., VAS, 1990, 82 p. (In Russian)
6. Borodulin R. Yu. *Chislennyye metody elektrodinamiki* [Numerical methods of electrodynamics]. SPb., VAS Publ., 2016, 180 p. (In Russian)
7. Jin J. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2002, 753 p.
8. Stutzman W. L., Thiele G. A. *Antenna Theory and Design*. 3rd ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2012, 848 p.
9. Berenger J. P. A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves. *J. Comp. Phys.*, 1994, vol. 114, no. 2, pp. 185–200.
10. Borodulin R. Yu., Klyuchko N. Yu. *Metodika rascheta kharakteristik antenn, raspolozhennykh v polubeskonechnoi srede s poteryami, metodom konechnykh elementov* [Calculating technique of antenna characteristics located in semi-infinite lossy medium by the finite element method]. *Informatsiya i kosmos. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2016, no. 2, pp. 41–44. (In Russian)
11. Batler C. M. The Equivalent Radius of a Narrow Conducting Strip. *IEEE Trans. Ant. & Prop.*, 1982, vol. AP-30, no. 7, pp. 755–758.
12. Gavelya N. P., Istrashkin A. D., Murav'ev Yu. K., Serkov V. P.; pod red. Murav'eva Yu. K. *Antenny: v 2 t. T. 1* [Antennas: 2 vol. Vol. 1]. L., VKAS Publ., 1963, 142 p. (In Russian)

Received December, 19, 2016

For citation: Borodulin R. Yu. Methods of increasing the efficiency of antennas embedded in a dissipative media. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 2, pp. 39–46. (In Russian)

Roman Yu. Borodulin – Ph.D. in Engineering (2010), Doctoral of the Department of Radio Communication of Military Academy of Communications (Saint Petersburg). Author of over 40 scientific papers. Area of expertise: numerical methods of electrodynamics; technical electrodynamics; antenna-feeder devices; radio wave propagation. E-mail: borodulroman@yandex.ru