

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ВДОЛЬ ПРОВОДНИКОВ ПРИЗЕМНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

© 2025 г. Ю. А. Костычев*, А. С. Ященко, С. В. Кривальцевич,
С. А. Варнаков

*Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН,
просп. К. Маркса, 15, Омск, 644024 Российская Федерация*

**E-mail: fatnblan@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.03.2024 г.

После доработки 23.01.2025 г.

Принята к публикации 30.01.2025 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости постоянной распространения электромагнитной волны вдоль проводников стелющихся антенн от свойств грунта в декаметровом диапазоне длин волн и проведено сравнение с известными аналитическими выражениями. Установлены точностные характеристики известных формул и дана оценка их применимости для решения практических задач.

Ключевые слова: антенно-фидерные устройства, стелющаяся антенна, приземная антенна, постоянная распространения волны, комплексная диэлектрическая проницаемость

DOI: 10.31857/S0033849425020044, **EDN:** GMJPJS

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Приземные излучатели или стелющиеся антенны (СА) декаметрового (3...30 МГц) диапазона волн (ДКМВ) являются проволочными антеннами, проводники которых расположены на границе воздух-грунт. СА применяют не только для радиосвязи [1], но и для исследования ионосферы [2] (в составе ионозондов) и земли [3] (в составе георадаров), поскольку они просты и удобны в эксплуатации и не требуют мачтовых устройств. Информация о характеристиках распространения электромагнитной волны (ЭМВ) вдоль проводников СА необходима при их проектировании. Распределение тока вдоль линейных проводников СА в гармоническом приближении $I(x) = I_0 \exp(-\gamma x)$ [4] (ось координат Ox совпадает с проводником, а точка возбуждения СА — с началом координат), где постоянная распространения $\gamma = \alpha + i\beta$ (α — коэффициент затухания, β — коэффициент фазы). По распределению тока вдоль проводников СА могут быть найдены ее основные характеристики: входное сопротивление и коэффициент усиления антенны. Частотные зависимости γ от характеристик грунта (его комплексной

диэлектрической проницаемости (КДП) $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$) применяют для анализа систем высокочастотного заземления [5]. Также актуальна и обратная задача восстановления неизвестных значений КДП грунта по измеренным значениям постоянной распространения ЭМВ вдоль проводников СА, размещенной на нем. Последнее позволяет проводить оперативный неразрушающий контроль грунта.

Результаты электродинамического анализа СА, позволяющие сформулировать частотную зависимость γ от характеристик грунта ϵ , приведенные в источниках, как в достаточно давно цитируемых [6–8], так и сравнительно свежих [9], существенно отличаются друг от друга. Зависимости γ от ϵ приведены в табл. 1 с указанием источника с единой системой обозначений.

В настоящее время проведены многочисленные измерения зависимостей γ от ϵ в диапазонах УКВ и СВЧ, например [10, 11], и их результаты достаточно хорошо коррелируют как с результатами аналитических представлений, так и электродинамического моделирования с помощью ЭВМ. Публикации с верификацией аналитических зависимостей γ от ϵ в ДКМВ-диапазоне отсутствуют.

Таблица 1. Зависимости постоянной распространения γ от характеристик грунта ϵ

Источник	Аналитическое выражение зависимости $\gamma(\epsilon)$
[6]	$\gamma = i\beta_0 \left\{ 1 + \frac{2}{\ln(2h/r)} \left[\frac{1}{(2\beta_1 h)^2} - \frac{K_1(2\beta_1 h)}{2\beta_1 h} + \right. \right. \\ \left. \left. + i\pi \frac{I_1(2\beta_1 h)}{4\beta_1 h} - i \left(\frac{2\beta_1 h}{3} + \frac{(2\beta_1 h)^3}{45} + \frac{(2\beta_1 h)^5}{1575} + \dots \right) \right] \right\}^{1/2}$
[7, 8]	$\gamma \approx i\sqrt{\frac{\beta_0^2 + \beta_1^2}{2}}$
[9]	$\gamma = i\beta_0 \sqrt{1 - \frac{iZ_s}{2\beta_0 h \ln\left(\frac{2h}{r}\right)}}$

Примечание: I_1 и K_1 — модифицированные функции Бесселя первого порядка первого и второго рода, соответственно; h — высота проводника над грунтом; r — радиус проводника; β_0 и β_1 — постоянная распространения ЭМВ в свободном пространстве и в грунте, соответственно; $Z_s = \beta_0/\beta_1$. Зависимость γ от ϵ заключена в зависимости $\beta_1 = \sqrt{\epsilon}\beta_0$, где $\epsilon = \epsilon' \left(1 - \frac{i\sigma}{\omega\epsilon'}\right)$ — КДП грунта с удельной проводимостью σ и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ' . Причем для всех источников аналитические выражения зависимости γ от ϵ' применимы в приближении $\beta_1 \gg \beta_0$.

Целью данной статьи стало проведение экспериментальных исследований постоянной распространения ЭМВ вдоль провода излучателя стелющейся дипольной антенны в ДКМВ-диапазоне и сравнение полученных результатов с аналитическими выражениями.

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для реализации поставленной цели выполнены измерения: а) профиля КДП грунта по глубине до 1 м; б) постоянной распространения ЭМВ вдоль проводников СА. Время и место проведения измерений: осень 2023 года на сухой песчаной и влажной засоленной глинистой почвах в Омской области (с координатами 54°59'44" с.ш. 72°39'11" в.д. и 54°63'10" с.ш. 73°93'60" в.д.).

При определении глубинного профиля КДП грунта его забор проведен с помощью почвенного бура (близкого по конструкции к буру Некрасова [12]). Измерение КДП грунта проведено на месте забора (для сохранения естественной влажности грунта) с помощью ячейки измерительной на базе симметричной полосковой линии, описанной в [13], и портативного аккумуляторного векторного анализатора цепей (ВАЦ). Измерения постоянной распространения γ проведено в месте забора грунта косвенно (с помощью модели длинной линии) по прямо измеренному двухпортовым ВАЦ входному импедансу Z симметричной дипольной СА. Для этого измеренный импеданс Z СА был аппроксимирован методом

наименьших квадратов функцией $Z_a = W \text{cth}(\gamma L)$ [6], где L — длина плеча СА, W — волновое сопротивление СА, которое изменяется с частотой пропорционально отношению β_0/β (1)

$$Z_a = \frac{W_0}{\beta/\beta_0} \text{cth}(\gamma L), \quad (1)$$

где $W_0 = 120[\ln(L/r) - 1]$ — волновое сопротивление СА в свободном пространстве, r — радиус провода излучателя СА [14].

Прямые измерения Z выполнены следующим образом (рис. 1). После развертывания плеч СА длиной

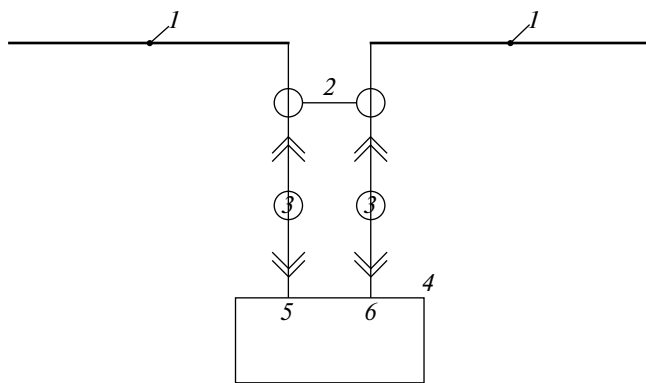


Рис. 1. Схема проведения измерения импеданса СА: 1 — проводник излучателя дипольной СА, 2 — оснастка, 3 — коаксиальные кабели, 4 — ВАЦ, 5 — порт 1, 6 — порт 2.

16 м, выполненных проводом МГШВ 1.0 [15], на месте забора грунта к каждому из них были подключены коаксиальные кабели (длиной 300 мм) посредством оснастки в виде двух СВЧ разъемов (типа SMA розетка приборная с фланцем), фланцы которых гальванически соединены медной пластиной шириной 10 мм, толщиной 0.5 мм и длиной 50 мм. Центральные жилы СВЧ разъемов соединены с проводниками излучателей СА и изолированы друг от друга. Коаксиальные кабели в свою очередь были подключены к портам ВАЦ для проведения измерения импеданса каждого из плеч СА Z_{11} и Z_{22} . Затем, не разбирая оснастки, были проведены измерения коэффициента передачи S_{12} между портами. Согласно методике измерения характеристик устройств с симметричным входом несимметричными приборами, изложенной в [16], по прямо измеренным значениям Z_{11} , Z_{22} (Ом) и S_{12} (в раз) были рассчитаны значения Z импеданса СА по формуле – все величины комплексные

$$Z = Z_{11} + Z_{22} - 2Z_{12} = Z_{11} + Z_{22} - 2S_{12}Z_{22}. \quad (2)$$

Размеры плеч СА L были выбраны достаточными не только для применения модели длинной линии (ограничение по длине снизу), но и для возможности наблюдения пульсаций импеданса (ограничение по длине сверху, обусловленное затуханием ЭМВ при распространении вдоль проводника СА).

Измерения мнимой части постоянной распространения γ были также проведены на трех частотах ДКМВ-диапазона через коэффициент укорочения β_0/β , выраженный как отношение первой частоты последовательного резонанса СА f к первой резонансной частоте f_0 ее излучателей в свободном пространстве, и как отношение волнового сопротивления излучателей на грунте к волновому сопротивлению СА в свободном пространстве (W/W_0). Как W_0 , так и f_0 определены расчетным путем. Волновое сопротивление СА на грунте было определено по активной части импеданса Z по формуле

$$W = \sqrt{R_{\min} R_{\max}}, \quad (3)$$

где максимальные R_{\max} и минимальные R_{\min} , следующие друг за другом по частоте ее значения [17]. Для определения коэффициента укорочения по частотному положению f первого последовательного резонанса СА f_0 определялась согласно $f_0 = c/4L$, где c – скорость света в свободном пространстве.

Выражения табл. 1 получены в приближении однородного грунта, поэтому в процессе их экспериментальной апробации был применен метод усреднения, описанный в [18] по определению эффективного значения КДП слоистого грунта.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результат измерения профиля КДП ϵ' и σ по глубине h приведены на рис. 2 для песчаной почвы (а) и для глинистой (б).

Эффективные значения составили $\epsilon'_{\text{эф}} = 16$ и $\sigma_{\text{эф}} = 120$ мСм/м для глинистой почвы и $\epsilon'_{\text{эф}} = 3.9$ и $\sigma_{\text{эф}} = 1.1$ мСм/м для песчаной почвы.

Результаты прямых измерений импеданса СА (сплошная линия для действительной части и линия точек для мнимой) и результат аппроксимации (квадраты и треугольники) с помощью формулы (3) приведены на рис. 3 для песчаной (а) и глинистой (б) почв.

Результаты измерения постоянной распространения ЭМВ γ (коэффициента фазы, отнесенного к коэффициенту фазы в свободном пространстве) приведены на рис. 4 (сплошная линия) совместно со значениями, полученными аналитически (линия точек для источника [6]) для песчаной (а) и глинистой (б) почв.

Крестом обозначены результаты определения коэффициента фазы через коэффициент укорочения по положению первого резонанса. Кругами с точками отмечены результаты определения коэффициента укорочения через значения волнового сопротивления. Первый последовательный резонанс для СА на песчаном грунте находился на частоте 2.23 МГц, а для глинистого грунта эта частота принимала значение 2.85 МГц.

По аналогии на рис. 5 приведены результаты измерения коэффициента затухания (отнесенного к коэффициенту фазы в свободном пространстве в масштабе 100:1) для песчаной (а) и глинистой (б) почв. В результатах рис. 4, 5 приведены аналитически полученные значения постоянной распространения γ лишь для источника [6], потому что результаты, полученные согласно источнику [7–9] существенно (в разы или даже порядки) отличаются как от [6], так и от экспериментальных данных. Значения коэффициента фазы и затухания, полученные для влажной глинистой почвы, приведены на рис. 6 в логарифмическом масштабе.

Необходимо отметить, что с ростом частоты (на частотах выше 100 МГц) результаты, полученные согласно источникам [6–9] становятся, практически, идентичными друг другу. Кроме того, данные источника [9] оказались наиболее близки к [6] и экспериментальным данным, нежели [7, 8], в ДКМВ-диапазоне (на частотах выше 20 МГц).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты измерений глубинного профиля грунта для песчаной почвы хорошо коррелируют с данными [19], а зависимость КДП глинистой почвы от глубины объясняется профилем влажности грунта.

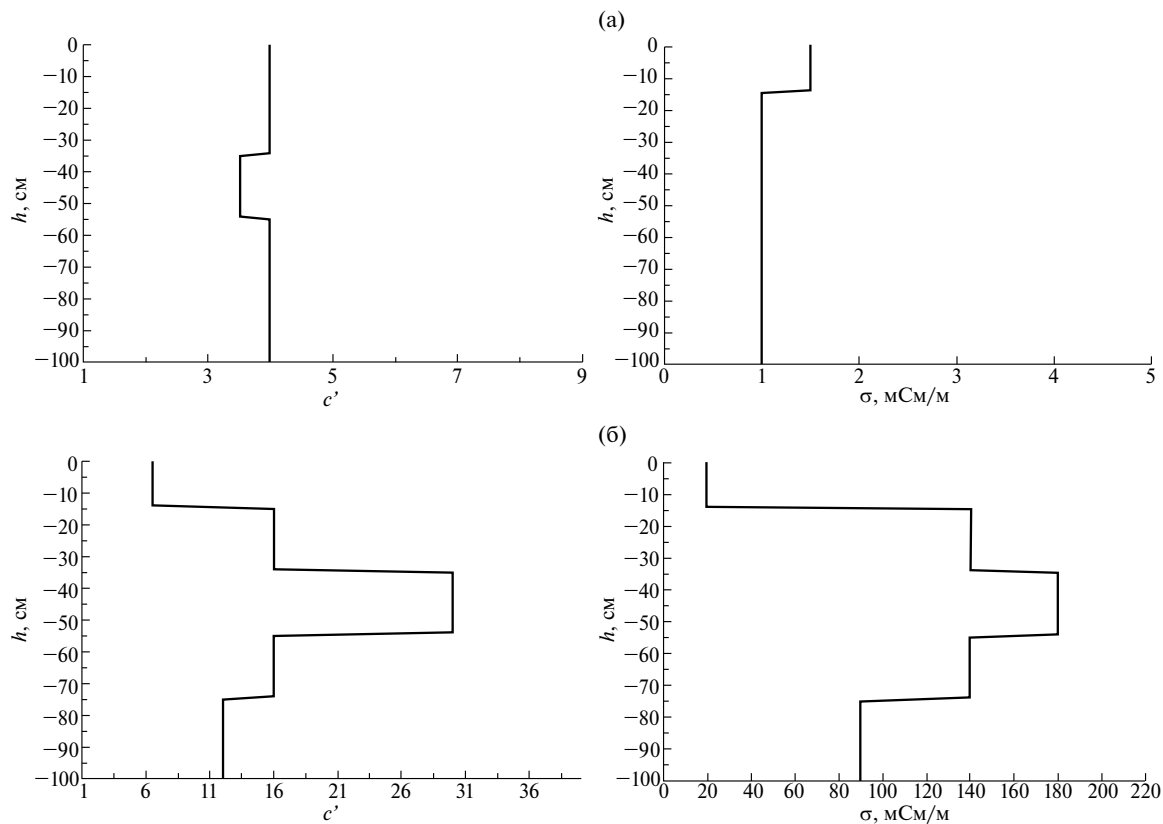


Рис. 2. Профиль действительной части КДП ε' и проводимости σ по глубине h для песчаной почвы (а) и глинистой (б).

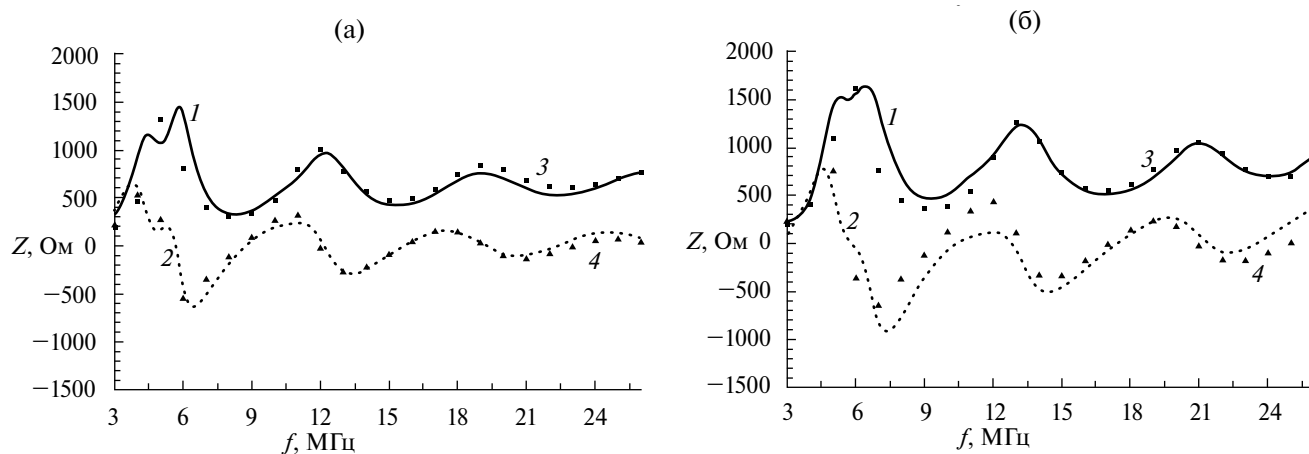


Рис. 3. Импеданс СА на песчаном (а) и глинистом (б) грунтах. Кривые 1 и 2 – действительная и мнимая части; кривые 3 и 4 – результаты аппроксимации.

Результаты прямых измерений импеданса СА аппроксимированы функцией (3) достаточно точно за исключением частотного диапазона в окрестности первых последовательного и параллельного резонансов, где СА может быть скорее представлена как два связанных резонатора, нежели как линия с распределенными параметрами. Несмотря на это, результаты, полученные с помощью

аппроксимации импеданса и посредством определения коэффициента укорочения по положению первого последовательного резонанса, отличаются не более чем на 5 % внизу диапазона (взято относительное отклонение значений). Коэффициенты укорочения, восстановленный согласно применяемой методике, и с помощью метода волновых сопротивлений, отличаются столь же мало. Что

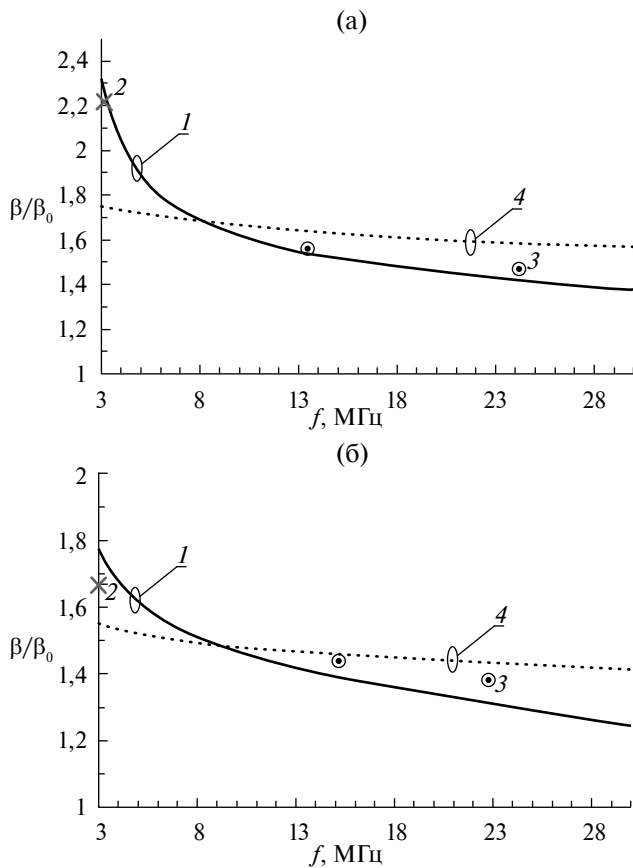


Рис. 4. Коэффициент фазы для песчаного (а) и глинистого (б) грунтов, определенный экспериментально (по формуле (1) (кривая 1), по положению первого последовательного резонанса (кривая 2), по волновому сопротивлению (кривая 3)) и согласно [6] (кривая 4).

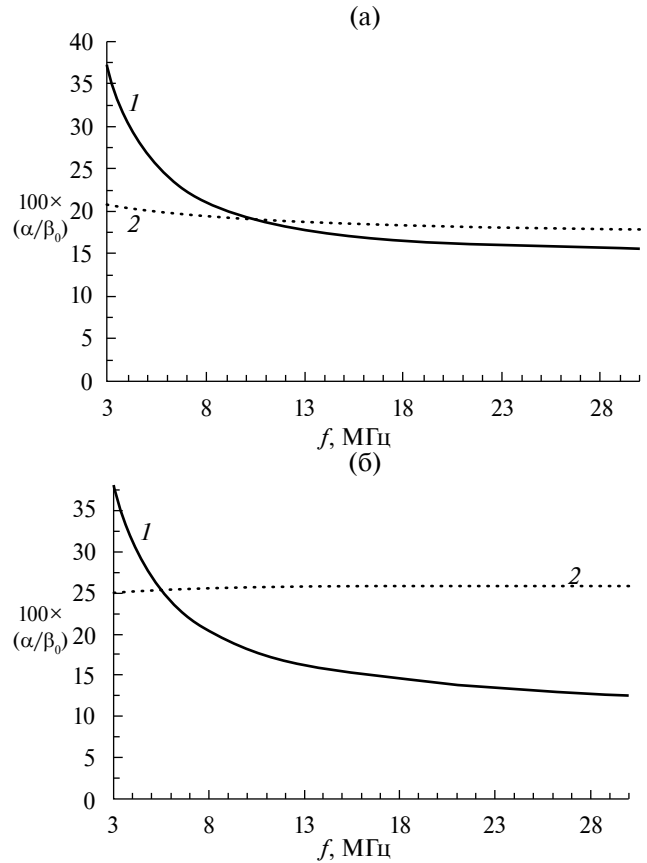


Рис. 5. Коэффициент затухания для песчаного (а) и глинистого (б) грунтов, определенный: экспериментально (кривая 1) и согласно [6] (кривая 2).

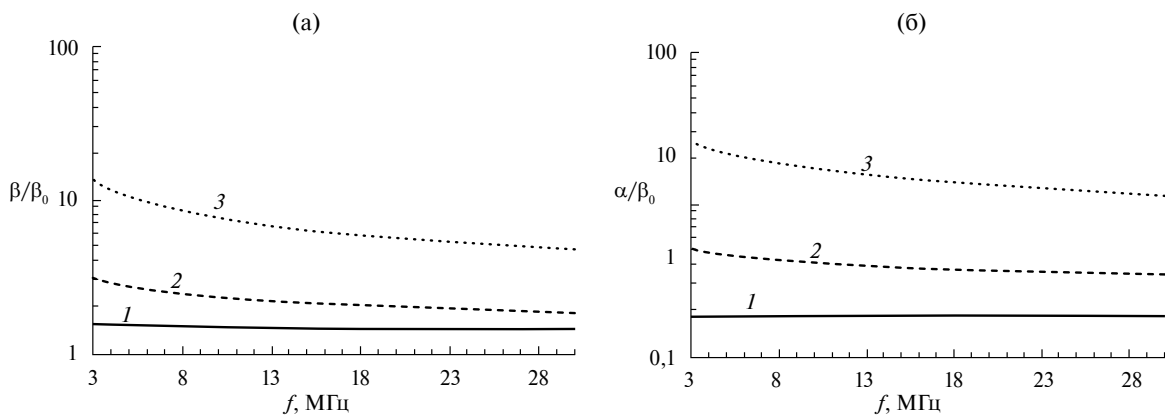


Рис. 6. Значения коэффициента фазы (а) и затухания (б), отнесенные к коэффициенту фазы в свободном пространстве, полученные: 1 согласно [6], 2 согласно [9] и 3 согласно [7, 8].

позволяет говорить о достоверности выполненных измерений постоянной распространения.

Относительные отклонения расчетных значений по [6] от измеренных для β мнимой части постоянной распространения не превышают 12 % и 25 % для глинистого и песчаного грунта соответственно. Меньшие отклонения для влажного глинистого грунта могут быть объяснены тем, что для него соотношение $\beta_1 \gg \beta_0$ удовлетворено в большей степени, нежели для сухого песчаного.

Относительные отклонения расчетных значений по [6] от измеренных для α действительной части постоянной распространения не превышают 105 % и 75 % для глинистого и песчаного грунта, соответственно. Наибольшие отклонения (равновеликие как в низкочастотной, так и в высокочастотной области ДКМВ-диапазона) для глинистого грунта, вероятно, связаны с его слоистой структурой его глубинного профиля. В отличие от практически однородного песчаного грунта, для которого отклонение на частотах выше 8 МГц составило не более 15 %.

Относительные отклонения расчетных значений постоянной распространения на десятки процентов (для мнимой части) и на сотню (для действительной) влекут за собой значительные отличия ожидаемых проектно характеристик СА от измеряемых натурно (например, как показано в [20], нижняя рабочая частота СА будет отличаться более чем в 2 раза).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена экспериментальная апробация известных аналитических способов вычисления постоянной распространения волны вдоль проводника симметричной дипольной стелющейся антенны и показано, что результаты определения постоянной распространения по формуле, приведенной в [6], отличаются наибольшей достоверностью. При этом наилучшие по точности результаты получены для однородного грунта.

Отмечены расхождения результатов эксперимента и расчетов по известным формулам. Повышение точности определения постоянной распространения электромагнитной волны вдоль проводников стелющихся антенн путем расчета требует дальнейших исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер государственной регистрации проекта 125013101211-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Operations Manual for the 302A Eyring Low Profile Antenna. Eyring Doc. 300–0086. Provo: Communication Systems Division of Eyring Inc, 1990. 101 p.
2. Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В. и др. // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 4. С. 11.
3. О Ен Ден. Экранированная антенна для георадаров. Патент РФ на полезную модель № 142226. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 17 от 20.06.2014.
4. King R.W.P., Owens M., Wu T.T. Lateral Electromagnetic Waves: Theory and Applications to Communications, Geophysical Exploration, and Remote Sensing. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2012.
5. Grcev L. Lightning Protection / Ed. by V. Cooray. Stevenage: IET, 2010. P. 503. https://doi.org/10.1049/PBPO058E_ch10
6. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах: в 2-х книгах. Кн. 1. М.: Мир, 1984. С. 96.
7. Лавров Г.А., Князев А.С. Приземные и подземные антенны. М.: Сов. радио, 1965. С. 293.
8. Coleman B.L. // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magaz. and Journal of Science. 1950. V. 41. № 314. P. 276.
9. Glybovski S.B., Akimov V.P., Zalipaev V.V. // 2015 Days on Diffraction (DD), St. Petersburg. 25–29 May. N.Y.: IEEE, 2015, Paper No. 7354843
10. Lestari A.A., Yarovoy A.G., Ligthart L.P. // IEEE Trans. 2004, V. AP-52, № 8. P. 1970.
11. Lestari A.A., Wahyu Y., Yarovoy A.G., Ligthart L.P. // 2007 Asia-Pacific Microwave Conf. Bangkok. 11–14 Dec. N.Y.: IEEE, 2007. Paper No. 4555092.
12. Сельскохозяйственная энциклопедия. Т. 1. М.: Гос. изд-во сельскохозяйств. лит., 1949.
13. Бобров П.П., Костычев Ю.А., Кривальцевич С.В., Родионова О.В. Устройство для измерения спектров диэлектрической проницаемости почв в широкой полосе частот на основе симметричной полосковой линии. Патент РФ № 2810948. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 1 от 09.01.2024.
14. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. М.: Радиотехника, 2009.
15. Провода медные с двухслойной изоляцией. Технические условия ТУ 16–705.264–82 М.: Гостандарт, 1984.40 с.
16. Попов О.В., Сосунов Б.В., Фитенко Н.Г., Хитров Ю.А. Методы измерений характеристик

- антенно-фидерных устройств. Л.: ВАС, 1990. С. 109.
17. Фрадин А.З., Рыжков Е.В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. М.: Связьиздат, 1962.
18. Park C.-H., Behrendt A., LeDrew E., Wulfmeyer V. // Remote Sensing. 2017. V. 9. № 7. Article No. 732.
19. Electrical Characteristics of the Surface of the Earth. Rec. ITU-R P. 527–4 Geneva: Int. Telecommun. Union, 2019. 21 p.
20. Костычев Ю.А., Яценко А.С., Кривальцевич С.В. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2023. Т. 28. № 4. С. 15.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF ELECTRO-MAGNETIC WAVE PROPAGATION ALONG THE CONDUCTORS OF HF BAND NEAR GROUND ANTENNA

© 2025 Yu. A. Kostychov*, A. S. Yashchenko, S. V. Krivaltsevich, S. A. Varnakov

*Institute of Radiophysics and Physical Electronics Omsk Scientific Center SB RAS,
K. Marx Prosp., 15, Omsk, 644024 Russian Federation*

**E-mail: fatnblan@mail.ru*

Received March 4, 2024; revised January 23, 2025; accepted January 30, 2025

The article presents the results of experimental studies of the dependence of the propagation constant of an electromagnetic wave along the conductors of HF band near ground antennas on the properties of the soil and a comparison with known analytical expressions. The accuracy characteristics of known formulas are established and an assessment of their applicability for solving practical problems is given.

Keywords: antenna-feeder devices, near-ground antenna, surface antenna, wave propagation constant, complex permittivity