

ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕНН В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

© 2017 А.И. Махов, Д.А. Ворох

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

Статья поступила в редакцию 31.08.2017

В учебной литературе по антеннам при решении задачи о поле излучения цилиндрического излучателя показано, что в ближней зоне этого излучателя поле обладает большой турбулентностью, то есть зависит от высших степеней расстояния r между антенной и точкой наблюдения. Представляет интерес проверить этот результат, например, для линейной антенны с равномерным распределением поля по длине.

Предложено определять поле в ближней зоне антенны путём интегрирования полей элементов волнового фронта по длине антенны. Получены расчетные соотношения, позволяющие определять поле излучения в точках наблюдения ближней зоны, и диаграммы направленности антенн. Результаты расчётов показали работоспособность предложенной методики.

Ключевые слова: поверхность излучения, поле, Ампер, Фарадей, напряжение, ток, вектор, методика, расчет, линейная антенна, диаграмма направленности.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно законам Ампера – Фарадея поле на поверхности излучения антенны задаётся в виде двух циркулирующих векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} . Поле излучения во внешнем пространстве можно определить путём интегрирования полей элементарных источников по заданным циркуляциям [1-5]. Если поле равномерное, а циркуляции прямые линии, то задача сводится к определению поля излучения линейных антенн. В данной работе получены удобные выражения для расчёта этих полей без учёта фазового множителя $e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$. Получены также выражения для расчёта полей линейных антенн с учётом фазового множителя. Получены аналогичные выражения для диаграмм направленности линейных антенн в ближней зоне. Критерием ближней зоны будем считать соизмеримость расстояния от точки наблюдения до антенны с длиной антенны.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОЧКАХ НАБЛЮДЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ

На рис. 1 в прямоугольных координатах x, y, ℓ представлена линейная антенна длиной L с центром в точке $\ell = x = 0$ и точка наблюдения M с координатами x, y . На антенне задан текущий элемент волнового фронта $d\ell$ с центром в точке A , r – расстояние между точкой M и точкой A . Из

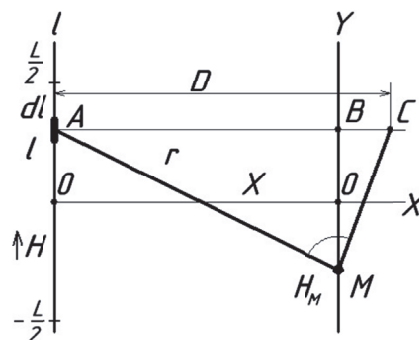


Рис. 1. Линейная антенна, пояснения к пункту 1

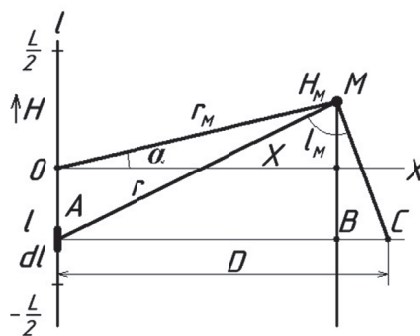


Рис. 2. Линейная антенна, пояснения к пункту 2

точки A проведём прямую линию AC , параллельную x , а из точки M проведём перпендикуляр MC к AM . В результате получим два подобных треугольника ABM и BCM . Из подобия треугольников следует $\frac{AB}{BM} = \frac{BM}{BC}$ или $D = AC = x + (\ell - y)^2/x$.

Расстояние D определяет амплитуду поля в точке M согласно диаграмме направленности элемента волнового фронта (окружность). Сравнивая циркуляции, например, вектора \mathbf{H} : $Hd\ell = dH_M \pi D$, получим величину поля в точке M , созданную элементом волнового фронта $d\ell$:

Махов Анатолий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника», старший научный сотрудник.

Ворох Дмитрий Александрович, аспирант.

E-mail: fallout2s@yandex.ru

$$dH_M = Hd\ell / \pi D.$$

Интегрируя далее по ℓ в пределах от $-L/2$ до $L/2$, будем иметь амплитуду поля, созданного в точке М линейной антенной L:

$$H_M = \frac{H}{\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dz}{1+Y^2-2YZ+Z^2} = \left[\frac{H}{\pi} \right] \operatorname{arctg} \frac{2z-2Y}{2} \Big|_{-L/2}^{L/2}, \quad (1)$$

где, $z = \ell/x$, $Y = y/x$. Интеграл (1) табличный, вычисляя его, получим:

$$H_M = \frac{H}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{\frac{L}{2}-y}{x} + \operatorname{arctg} \frac{\frac{L}{2}+y}{x} \right]. \quad (2)$$

Далее удобно перейти к относительным единицам:

$H_{\text{Мотн}} = H_M/H$, $L_{\text{отн}} = L/2x$, $y_{\text{отн}} = y/x$, а для боковых ветвей ($y < 0, y > 0$) ещё $H_{\text{Мотн}}(y)/H_{\text{Мотн}}(0)$.

В результате получено следующее обобщённое выражение:

$$H_{\text{Мотн}} = \left[\operatorname{arctg}(L_{\text{отн}} - y_{\text{отн}}) + \operatorname{arctg}(L_{\text{отн}} + y_{\text{отн}}) \right] / \pi. \quad (3)$$

Полученное выражение может быть использовано для определения полей излучения конкретных линейных антенн в ближней зоне.

На рис. 3 представлены результаты расчёта поля излучения антенны длиной 1 м на расстояниях $x = 0,01; 0,1; 0,4; 0,7; 1,0$ м. Из рисунка видно, что на близких расстояниях (до 1 м) распределение поля практически совпадает с распределением поля непосредственно на антенне (почти равные амплитуды и слабое боковое излучение). На расстояниях $x = 0,4$ и более форма амплитудного распределения поля по координате y колоколообразная с сильным боковым излучением.

С учётом фазового множителя выражение для расчёта амплитуды поля в точке М будет выглядеть следующим образом:

$$H_{\text{Мотн}} = \frac{1}{\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\exp jk(r-r_0) dz}{1+Y^2-2YZ+Z^2}, \quad (4)$$

где $r = x \sqrt{1+z^2-2YZ+Y^2}$,
 $r_0 = x \sqrt{1+z^2}$, $z = \ell/x$, $Y = y/x$.

2. ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕНН

На рис.2 в прямоугольных координатах ℓ, x представлена линейная антенна, длиной L и центром в точке $\ell = x = 0$ и точка наблюдения М с координатами x, ℓ_M . Угол α – угол наблюдения точки М относительно антенны (угол поворота антенны), r_M – радиус наблюдения, $r_M = \text{const}$. На антенне имеем текущий элемент волнового фронта длиной $d\ell$ с координатой ℓ , r – расстояние от центра А элемента $d\ell$ до точки М. Проведём из точки М перпендикуляр к АМ до пересечения с нормалью к $d\ell$. В результате получим два подобных треугольника АВМ и ВСМ. Из подобия треугольников имеем:

$$AB \cdot BC = MB^2 \text{ или } AC = AB + BC \text{ или } D = x + (\ell_M - \ell)^2/x.$$

D – определяет амплитуду поля в точке М согласно диаграмме направленности элемента волнового фронта $d\ell$. Из сравнения циркуляций имеем:

$$Hd\ell = dH_M \pi D \text{ или } dH_M = Hd\ell / \pi D.$$

Подставляя значение D и интегрируя по ℓ , получим выражение для вычисления поля в точке М:

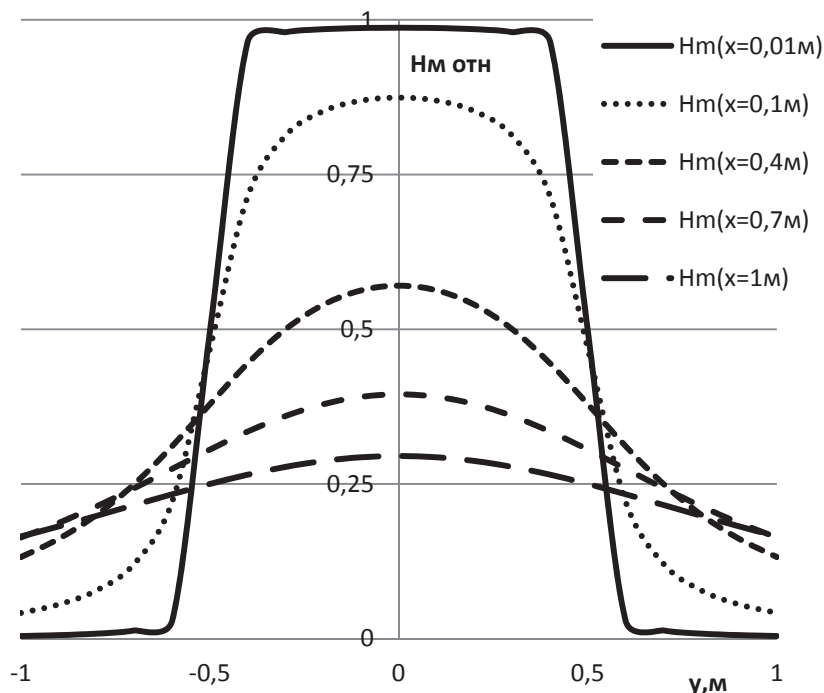


Рис. 3. Распределение поля излучения антенны L= 1 м

$$H_M = \frac{H}{\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{d\ell x}{x^2 + \ell_m^2 - 2\ell_m \ell + \ell^2},$$

с учётом равенств $x = r_M \cos \alpha$, $\ell_m = r_M \sin \alpha$ будем иметь формулу для вычисления диаграммы направленности антенны:

$$H_M = \frac{H \cos \alpha}{\pi} \int_{-B}^B \frac{dy}{1 - 2y \sin \alpha + y^2}, \quad (5)$$

где $y = \ell / r_M$, $dy = d\ell / r_M$, $B = L / 2r_M$

Интеграл (5) табличный: $a = c = 1$, $b = 2 \sin \alpha$, $4ac > b^2$. Учитывая это, получим следующее выражение для вычисления диаграммы направленности линейной антенны:

$$H_{\text{Мотн}} = \frac{1}{\pi} \left(\arctg \frac{B - \sin \alpha}{\cos \alpha} + \arctg \frac{B + \sin \alpha}{\cos \alpha} \right), \quad (6)$$

где $B = L / 2r_M$, $H_{\text{Мотн}} = H_M / H$.

На рис. 4 представлены результаты расчёта диаграмм направленности антенны длиной $L = 1$ м, измеряемых на расстояниях $r = 1, 5, 50$ м. Из рисунка видно, что в ближней зоне ($r = 1$ м) диаграмма направленности сужается с 100° ($r = 100$ м) до 30° (по уровню 0,5).

С учётом фазового множителя получим следующее выражение:

$$H_{\text{Мотн}} = \frac{\cos \alpha}{\pi} \int_{-B}^B \frac{\exp jk(r - r_0) dy}{1 - 2y \sin \alpha + y^2}, \quad (7)$$

где $r = r_M \sqrt{1 - 2y \sin \alpha + y^2}$,
 $r_0 = r_M \sqrt{1 + y^2}$, $B = L / 2r_M$.

ВЫВОДЫ

Таким образом, получены соотношения (3),(4), которые можно использовать для вычисления распределений поля и диаграмм направленности линейных антенн в ближней зоне, и выражения (4),(7) позволяющие оценить влияние фазового множителя на эти характеристики. Помимо этого в работе представлены результаты распределения поля линейных антенн и диаграмм направленности в ближней зоне этих антенн без учёта фазы поля на антенне, что соответствует постоянному и низкочастотному полям.

Результаты расчётов полей излучения высокочастотных антенн будут представлены в следующих работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кубанов В.П. и др. Основы теории и распространения радиоволн: учебное пособие. Самара: ООО «Офорт», 2016. 258 с.
2. Неганов В.А. и др. Современная теория и практи-

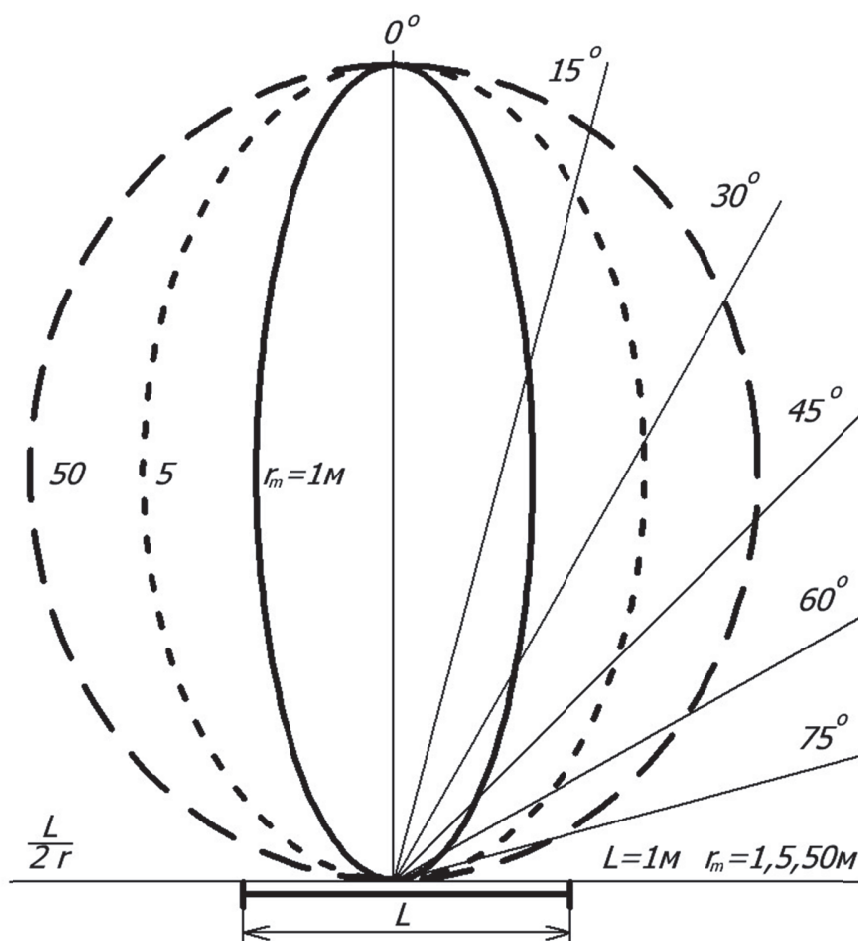


Рис. 4. Диаграммы направленности антенны длиной $L = 1$ м для расстояний $r_m = 1, 5, 50$ м

- ческие применения антенн. М.: Радиотехника, 2009. 720 с.
3. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов. М.: Связь, 1973. 480 с.
4. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1961. 384 с.
5. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.

FIELD OF RADIATION OF LINEAR ANTENNAS IN THE NEAR ZONE

© 2017 A.I. Mahov, D.A. Vorokh

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

In the literature on antennas, when solving the problem of the radiation field of a cylindrical radiator, it is shown that in the near zone of this radiator the field has a large turbulence, that is, it depends on the higher degrees of the distance r between the antenna and the observation point. It is of interest to verify this result, for example, for a linear antenna with a uniform field distribution along the length. It is proposed to determine the field in the near zone of the antenna by integrating the fields of the wave front elements along the length of the antenna. The calculated ratios allowing to determine the radiation field at the near-field observation points and the antenna pattern are obtained. The results of calculations showed the operability of the proposed methodology.

Keywords: Radiation field, field, Ampere, Faraday, voltage, current, vector, technique, calculation, linear antenna, directional pattern.

Anatoly Makhov, Candidate of Technics, Associate Professor
at the Radio Engineering Department, Senior Research
Fellow.

Dmitry Vorokh, Graduate Student.
E-mail: fallout2s @ yandex.ru