

УДК 621.396.677

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИПОЛЬНЫХ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ
МНОГОЛУЧЕВЫХ ДИРЕКТОРНЫХ АНТЕНН****А.П. Горбачев, А.В. Шведова***Новосибирский государственный технический университет*

Анализируется новый возбудитель директорных антенн, представляющий собой диполь с центрально-концевым питанием. Данный возбудитель характеризуется конечным углом отклонения максимума диаграммы направленности от перпендикуляра к оси обоих коллинеарных проводников. Такая реализация возбудителя позволяет обеспечить хорошее согласование директорной антенны с питающим коаксиальным кабелем и реализовать конструкции с произвольным отклонением максимума диаграммы направленности от оси стрелы антенны в плоскости электрического вектора E . На основе метода наводимых электродвижущих сил получены уравнения для комплексного входного сопротивления возбудителя. По результатам вычислений построены графики зависимости вещественной и мнимой составляющих комплексного входного импеданса диполя с центрально-концевым питанием от его относительной длины, которые использованы далее для формирования стартового облика облучателя с печатным делителем мощности для целей полноволнового моделирования и экспериментальных исследований. Численное моделирование параметров облучателя показало их хорошее совпадение с результатами измерений. Предлагаемый диполь с центрально-концевым питанием может найти применение не только в директорных антеннах, но и в фазированных антенных решетках, турникетных и кардиоидных излучателях, а также других многодипольных антенных системах.

Ключевые слова: диполь, диаграмма направленности, директорная антенна, комплексное входное сопротивление, электромагнитное поле.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-34-47

Введение

Известно, что дипольные директорные антенны широко применяются в беспроводных телекоммуникационных системах с линейной поляризацией радиоволн [1–8]. Недостатком таких антенн является тот факт, что направление максимума их излучения определяется их ориентацией антенной стрелы, на которой ортогонально ей крепятся диполи. Иными словами, до настоящего времени в отечественной литературе не описаны технические решения, позволяющие реализовать с одной директорной антенны (т.е. с одной конструктивно-сборочной единицы) несколько направлений максимумов излучения.

Между тем авторами данной работы недавно предложена новая вибраторная антенна [9], отличающаяся от классического диполя тем, что ее возбуждение осуществляется как с удаленного, так и со смежного конца двух коллинеарных цилиндрических проводников, реализуя так называемое центрально-концевое питание диполя (вибратора). Предложенная антенна, имея другую частотную характеристику сопротивления излучения, характеризуется конечным углом отклонения максимума диаграммы направленности от перпендикуляра к оси обоих коллинеарных проводников. Можно ожидать, что такая антенна, будучи радиочастотным облучателем соответствующих директоров (направителей), позволит

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания, код проекта 629.

реализовать директорную антенну с отклоненным от оси стрелы максимумом диаграммы направленности, что создаст благоприятные предпосылки к построению хорошо согласованных с источником сигнала многолучевых директорных антенн.

Цель работы: проанализировать дипольный излучатель с центрально-концевым питанием и оценить его пригодность для реализации возбуждателей хорошо согласованных многолучевых директорных антенн.

1. Диаграмма направленности дипольных возбуждателей с центрально-концевым питанием

Анализируемый возбуждатель содержит два коллинеарных (т. е. соосных, с общей осью z (позиция 1 на рис.1)) идентичных цилиндрических проводника 2 и 3 с радиусом a , смежные концы 4 и 5 которых расположены в непосредственной близости:

$$a \leq 0,01\lambda_c, \quad b \leq 0,05\lambda_c, \quad (1)$$

где λ_c – средняя длина волны рабочего диапазона частот $f_L \dots f_H$:

$$\lambda_c = 3 \cdot 10^8 / f_c, \quad \lambda_c = (f_L + f_H) / 2. \quad (2)$$

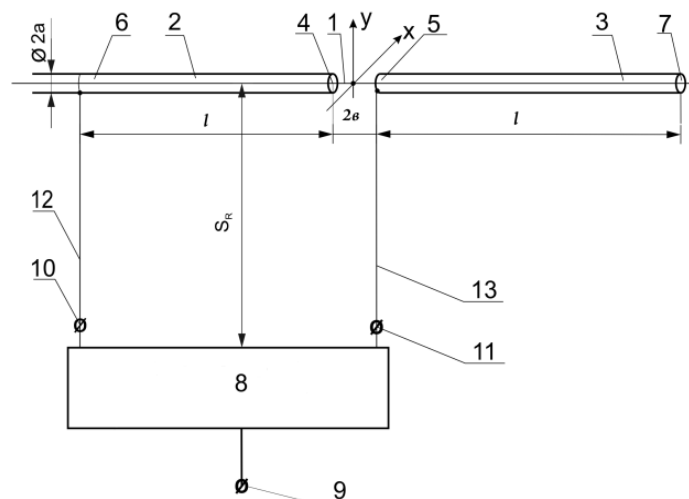


Рис.1 – Дипольный излучатель с центрально-концевым питанием

Fig. 1 – The center-end-fed dipole radiator

Эти ограничения соответствуют классификации зазоров и диаметров проводников, принятой в области проволочных дипольных антенн [1]. Напряжения, питающие рассматриваемый возбуждатель, подаются как к смежному концу 5 проводника 3, так и к удаленному концу 6 проводника 2. Эти напряжения снимаются с выходов 10 и 11 двухканального равноамплитудного делителя мощности 8, ко входу 9 которого подключен питающий директорную антенну коаксиальный кабель. Выходы 10 и 11 делителя 8 соединены с концами 5 и 6 проводников возбуждателя отрезками линий передачи 12 и 13, которые имеют соответствующее конструктивно-технологическое исполнение, как то: отрезки коаксиального кабеля, печатные симметричные/несимметричные линии, копланарные волноводы и т. п.

Подбором длин упомянутых линий передачи 12 и 13 обеспечивается требуемая разность фаз α напряжений, питающих возбудитель. Под воздействием этих напряжений на проводящей поверхности цилиндрических проводников 2 и 3 (рис. 1) возникают высокочастотные электрические токи, которые распределяются вдоль проводников так, что возбуждаемое ими в окружающем пространстве электромагнитное поле удовлетворяет уравнениям Максвелла и граничным условиям на поверхности проводников. В соответствии с общей методикой анализа любых излучателей вначале решается внутренняя задача, позволяющая найти распределение сторонних токов по излучающим элементам (в частности по их поверхностям), а затем в процессе решения внешней задачи находятся необходимые эксплуатационные характеристики облучателя [1].

Внутренняя задача для данного возбудителя с центрально-концевым питанием уже решена в [2], где найдено, что выражение для «нитевидного» тока проводимости вдоль проводников 2 и 3 имеет вид

$$\vec{I}(x' = 0, y' = 0, z') = \begin{cases} \vec{z}_0 I_m e^{j\alpha} \sin[k(l - z')], & 0 < z' \leq l, \\ \vec{z}_0 I_m \sin[k(-z)], & -l \leq z' < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где штрихи у координат (x', y', z') означают принадлежность текущей точки рассмотрения проводнику 2 и 3 только; I_m – амплитуда синусоиды; k – волновое число; l – длина проводника. Поэтому можно приступить к решению внешней задачи, в частности той ее части, которая связана с диаграммой направленности возбудителя. Для этого весь возбудитель в интервале $[-l, +l]$ (рис.1) разбивается на большое число коротких фрагментов длиной $\Delta z'$, каждый из которых мыслится как элементарный диполь Герца [1]. Затем число фрагментов устремляется к бесконечности ($\Delta z' \approx dz'$), что позволяет записать θ -компоненту напряженности электрического поля dE_θ в произвольной точке $P(x, y, z)$ [или $P(R, \theta, \varphi)$] дальней зоны Фраунгофера как [1]

$$dE_\theta = j\eta \frac{kI(z')e^{-jkR_s}}{4\pi R_s} \sin \theta_1 dz', \quad (4)$$

здесь $\vec{R}_s = \vec{R} - \vec{z}'$ есть разностный вектор между радиусом-вектором $\vec{R}(x, y, z)$ произвольной точки наблюдения $P(x, y, z)$ и текущим радиусом-вектором $\vec{z}' = \vec{z}_0 z'$ точки рассмотрения (будущего интегрирования) $Q(x', y', z')$, перемещающейся по оси z' проводников 2 и 3 от точки $z' = -l$ до точки $z' = +l$; θ_1 – угол между разностным вектором \vec{R}_s и осью z в положительном ее направлении; η – характеристическое сопротивление пространства, окружающего возбудитель.

Для точек дальней зоны Фраунгофера справедливы соотношения [1]:

$$\theta_1 = \theta; \quad R_s \approx R - z' \cos \theta; \quad 1/R_s \approx 1/R. \quad (5)$$

Поэтому итоговое выражение для напряженности электрического поля всего облучателя можно записать на основании принципа суперпозиции в виде

$$E_\theta = \int_{-l}^l dE_\theta = j\eta \frac{ke^{-jkR}}{4\pi R} \sin \theta \int_{-l}^l I(z') e^{jkz' \cos \theta} dz'. \quad (6)$$

Пусть вначале разность фаз α выходных напряжений делителя 8 равна нулю, что соответствует использованию синфазного питания возбуждителя, например, кольцевым делителем мощности $\lambda/2$. Тогда после подстановки в (6) распределения тока (3) при $\alpha = 0$ можно записать:

$$E_{\theta} = j\eta \frac{kI_m}{4\pi} \sin \theta \frac{e^{-jkR}}{R} \left[\int_{-l}^0 \sin[k(-z')] e^{jkz' \cos \theta} dz' + \int_0^l \sin[k(l-z')] e^{jkz' \cos \theta} dz' \right]. \quad (7)$$

Каждый из интегралов в (7) вычисляется с использованием неопределенного интеграла вида

$$\int e^{ax} \sin(bx+c) dx = \frac{e^{ax}}{a^2+b^2} [a \sin(bx+c) - b \cos(bx+c)], \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} a &= jk \cos \theta, \quad -l \leq z' \leq +l, \\ c &= 0, \quad \text{если } -l \leq z' < 0, \\ c &= kl, \quad \text{если } 0 < z' \leq +l, \\ b &= -k, \quad -l \leq z' \leq +l. \end{aligned} \quad (9)$$

После преобразований (7) примет вид

$$E_{\theta} = j\eta \frac{I_m e^{-jkR}}{4\pi R} \left[\frac{Q}{\sin \theta} \right], \quad (10)$$

Здесь

$$\begin{aligned} Q &= \operatorname{Re}[Q] + jI_m[\operatorname{Im}[Q]]; \\ \operatorname{Re}[Q] &= 1 - \cos(kl \cos \theta) \cos(kl) + \cos(kl \cos \theta) - \\ &\quad - \sin(kl \cos \theta) \cos \theta \sin(kl) - \cos(kl); \\ \operatorname{Im}[Q] &= \sin(kl \cos \theta) \cos(kl) + \sin(kl \cos \theta) - \\ &\quad - \cos(kl \cos \theta) \sin(kl) \cos \theta - \cos \theta \sin(kl). \end{aligned}$$

Используя (10) для построения диаграмм направленности, можно прийти к заключению, что при $\alpha = 0$ ее максимум ориентирован перпендикулярно оси z облучателя, а сама диаграмма удовлетворяет критерию всенаправленности в плоскости магнитного вектора, так как $H_{\varphi} = E_{\theta}/\eta$. Если же разность фаз α отличается от нуля, то плоскость всенаправленности наклоняется к оси z в ту или иную сторону в зависимости от знака α . Это открывает возможность изменять направление излучения директорной антенны за счет электрической коммутации p - i - n -диодами длин соединительных линий 12 и 13 (рис. 1), формируя таким образом *многолучевую директорную антенну*.

2. Комплексное входное сопротивление дипольных возбудителей центрально-концевым питанием

Расчет комплексного входного сопротивления ведется согласно методу наводимых электродвижущих сил [1, 10–11], в котором произведение продольной составляющей $E_z(z)$ электрического поля на боковой поверхности цилиндров диполя и комплексно-сопряженного распределения тока (3) интегрируется по длине обоих цилиндров от $z = -l$ до $z = +l$. При этом должно быть учтено, что для произвольной точки рассмотрения z' оси цилиндров справедливо соотношение [1]

$$\frac{d^2 I(z')}{dz'^2} + k^2 I(z') = 0. \quad (11)$$

Продольная составляющая $E_z(z)$ определяется составляющей запаздывающего векторного электродинамического потенциала $\vec{A}(x, y, z) = \vec{z}_0 A_z(z)$ [1]:

$$E_z(z) = \frac{1}{j\omega\epsilon_a} \left[k^2 A_z(z) + \frac{d^2 A_z(z)}{dz^2} \right], \quad (12)$$

где $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды вокруг диполя; ω – круговая частота источника сигнала, подключенного ко входу 9 делителя мощности 8 (рис. 1). В свою очередь сам потенциал $\vec{A}(x, y, z)$ рассчитывается как [1]

$$\begin{aligned} \vec{A}(x, y, z) = \vec{z}_0 A_z(z) = \vec{z}_0 \frac{I_m}{4\pi} \left\{ \int_{-l}^0 \sin[k(-z')] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \right. \\ \left. + \int_0^l \sin[k(l-z')] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь

$$r = \sqrt{a^2 + (z - z')^2}, \quad (14)$$

иными словами, переменная r зависит как от z , так и от z' , что следует учитывать далее при преобразованиях следующего выражения:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 A_z(z)}{dz^2} &= \frac{d^2}{dz^2} \left[\int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] = \int_{-l}^l \frac{d^2}{dz^2} \left[I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz' = \\ &= \int_{-l}^l I(z') \frac{d^2}{dz^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz', \end{aligned} \quad (15)$$

а именно: производная от интеграла по z' (со штрихом) берется по переменной z (без штриха). Поэтому не имеет значения, когда дифференцировать по z (без штриха): до интегрирования по z' (со штрихом) или после интегрирования по z' (со штрихом). Затем все, что зависит от z' (со штрихом) только, выносится за производную, но не за интеграл. Кроме того, далее будет использована следующая взаимосвязь вторых производных выражения (14):

$$\frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] = \frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right], \quad (16)$$

что приводит к результату:

$$\begin{aligned} E_z(z) &= \xi \left\{ k^2 \int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \frac{d^2}{dz'^2} \left[\int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] \right\} = \\ &= \xi \left\{ k^2 \int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_{-l}^l I(z') \frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz' \right\} = \\ &= \xi \left\{ k^2 \int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \text{Int} \right\}, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\xi = \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_a}. \quad (18)$$

Входящий в выражение (17) интеграл Int представляем суммой двух интегралов J_1 по левой ветви диполя $[-l, 0]$ и J_2 по правой половине диполя $[0, +l]$:

$$\begin{aligned} \text{Int} &= J_1 + J_2 = \int_{-l}^0 I_m \sin[k(-z')] \frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz' + \\ &+ \int_0^l I_m \sin[k(l-z')] \frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz', \end{aligned} \quad (19)$$

а затем каждый из интегралов J_1 и J_2 дважды интегрируем по частям. В результате при $\alpha = 0$ (синфазный делитель мощности 8 на рис.1) получаются следующие результаты:

$$J_1 = J_{11} - J_{12} + J_{13}, \quad (20)$$

$$J_{11} = -I_m \sin(kl) (1 + jkR_2) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} \frac{(z+l)}{R_2^2}, \quad (21)$$

$$J_{12} = -I_m k \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} + I_m k \cos(kl) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2}, \quad (22)$$

$$J_{13} = \int_{-l}^0 \frac{d^2}{dz'^2} I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz', \quad (23)$$

$$J_2 = J_{21} - J_{22} + J_{23}, \quad (24)$$

$$J_{21} = -I_m \sin(kl) \frac{z}{R_0^2} (1 + jkR_0) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0}, \quad (25)$$

$$J_{22} = kI_m \cos(kl) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} - kI_m \frac{e^{-jkR_1}}{R_1}, \quad (26)$$

$$J_{23} = \int_0^l \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} \frac{e^{-jkr}}{r} dz', \quad (27)$$

$$R_1 = \sqrt{a^2 + (z-l)^2}; R_2 = \sqrt{a^2 + (z+l)^2}; R_0 = \sqrt{a^2 + z^2}. \quad (28)$$

Подставляя формулы (20)–(27) в выражение (17), последовательно получаем:

$$\begin{aligned} E_z(z) &= \xi \left\{ k^2 \int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + J_{11} - J_{12} + J_{13} + J_{21} - J_{22} + J_{23} \right\} = \\ &= \xi \left\{ \left[k^2 \int_{-l}^0 I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_{-l}^0 \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] + J_{11} - J_{12} + \right. \\ &\quad \left. + \left[k^2 \int_0^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_0^l \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] + J_{21} - J_{22} \right\} = \\ &= \xi \{ J_{11} - J_{12} + J_{21} - J_{22} \}. \end{aligned} \quad (29)$$

Здесь учтено, что обе квадратные скобки в (29) тождественно равны нулю на основании свойства (11). Далее следует отметить, что

$$\frac{k}{\omega \epsilon_a} = 120\pi. \quad (30)$$

Поэтому на заключительном шаге анализа получаем следующие выражения для комплексного входного сопротивления $Z_m = R_m + jX_m$, отнесенного к току I_m в максимуме синусоиды распределения (другими словами: к пучности I_m распределения (3) тока проводимости вдоль диполя с центрально-концевым питанием):

$$\begin{aligned} Z_m = R_m + jX_m &= -\frac{1}{I_m I_m^*} \int_{-l}^l E_z(z) I_m^*(z) dz = \\ &= -\frac{1}{I_m^2} \int_{-l}^0 -j30I_m [s_1 + s_2 + s_3 + s_4] I_m \sin(k|z|) dz + \\ &+ \left\{ -\frac{1}{I_m^2} \int_0^l -j30I_m [t_1 + t_2 + t_3 + t_4] I_m \sin[k(l-z)] dz \right\}, \end{aligned} \quad (31)$$

где

$$s_1 = -\sin(kl)(1 + jkR_2) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} \frac{z+l}{(kR_2^2)}, \quad (32)$$

$$s_2 = \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} - \cos(kl) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2}, \quad (33)$$

$$s_3 = -\sin(kl)(1 + jkR_0) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} \frac{z}{(kR_0^2)}, \quad (34)$$

$$s_4 = \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} - \cos(kl) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0}, \quad (35)$$

причем величины t_1, t_2, t_3 и t_4 определяются по тем же формулам, что и s_1, s_2, s_3, s_4 , только с учетом знака переменной z . По результатам вычислений построены графики R_m и X_m для различных значений радиуса a (рис. 2), которые использованы далее для формирования стартового облика облучателя с печатным делителем мощности δ для целей полноволнового моделирования и экспериментальных исследований.

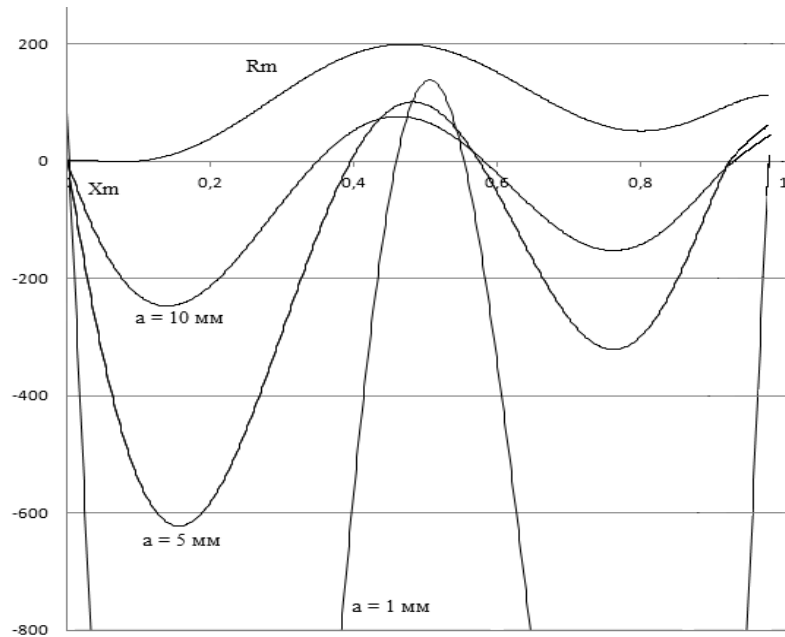


Рис. 2 – Зависимость вещественной R_m и мнимой X_m составляющих комплексного входного импеданса диполя с центрально-концевым питанием от его относительной длины

Fig. 2 – The real R_m and imaginary X_m parts of complex input impedance of center-end-fed dipole radiator as the functions of relative length

3. Полноволновое моделирование и результаты экспериментальных исследований

Для экспериментального подтверждения полученных результатов был изготовлен дипольный облучатель с центрально-концевым питанием на частоту $f_c = 2,1$ ГГц. Была поставлена задача сформировать отклоненную в плоскости

электрического вектора диаграмму направленности на 20° от оси вправо, т. е. угловое положение максимума диаграммы характеризуется углом сферической системы координат $\theta = 110^\circ$. Использование материалов раздела 1 показало, что разность фаз α возбуждения плеч диполя должна составить $\alpha = 86^\circ$. Поэтому для реализации облучателя был выбран микрополосковый кольцевой делитель мощности $\lambda_c/2$ с удлинением одного из выходов на величину, близкую к $\lambda_c / (4\sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}})$, где $\epsilon_{\text{эфф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость отечественного диэлектрика ФЛАН-5 (ариллокс, наполненный двуокисью титана [4], $\epsilon_r = 5$) толщиной 2,0 мм. При этом волновое сопротивление питающего коаксиального кабеля составило 50 Ом, а расчет геометрических размеров топологии кольцевого делителя (рис. 3) выполнялся по материалам работы [13]. Оба цилиндрических плеча диполя были реализованы из отрезков медной трубки, образующей наружный проводник полужесткого коаксиального кабеля РК-50-2-25-А [14, 15], в результате чего исследуемый облучатель приобрел облик, представленный на рис. 4.

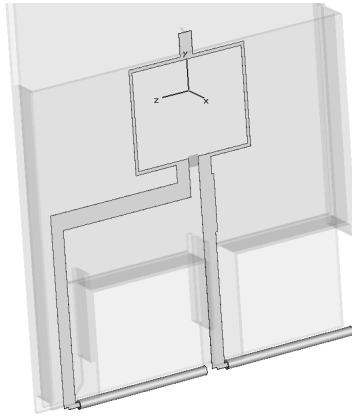
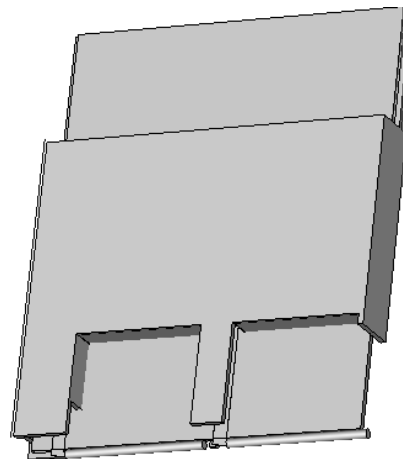


Рис. 3 – Взаимное расположение печатного кольцевого делителя и излучающих цилиндрических проводников диполя

Fig. 3 – The common view of printed ring power divider and radiating cylindrical wires of dipole

Рис. 4 – Внешний вид дипольного возбуждителя

Fig. 4 – The external view of the dipole driver



Согласование спроектированного излучателя характеризуется рис. 5 (сплошная линия – моделирование, точки – эксперимент), причем для полноволнового моделирования использовался программный продукт WIPL-D, свободно продающийся на рынке в виде компакт-диска, прилагающегося к работе [16]. Сечение пространственной диаграммы направленности в плоскости yoz электрического вектора представлено на рис. 6, что подтверждает факт отклонения максимума излучения на 20° вправо от оси y . На рис. 7 изображено сечение пространственной диаграммы направленности плоскостью, проходящей через ось x , перпендикулярную плоскости yoz под углом $\theta = 110^\circ$, свидетельствующее о хорошей степени симметрии диаграммы

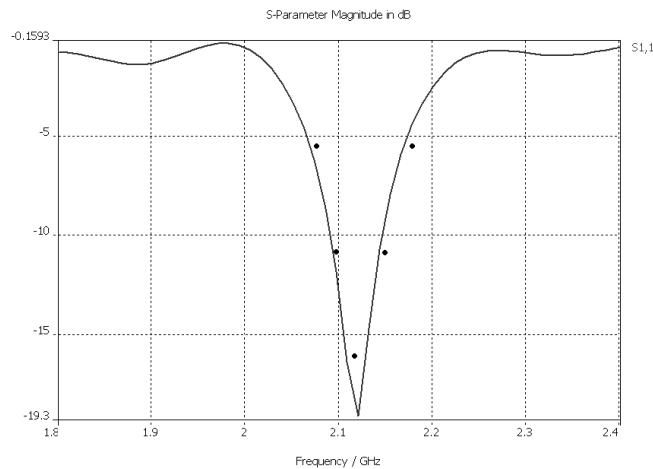


Рис. 5 – Частотная характеристика возвратных потерь возбуждителя с центрально-концевым питанием

Fig. 5 – The return loss of the driver with center-end-fed excitation versus frequency

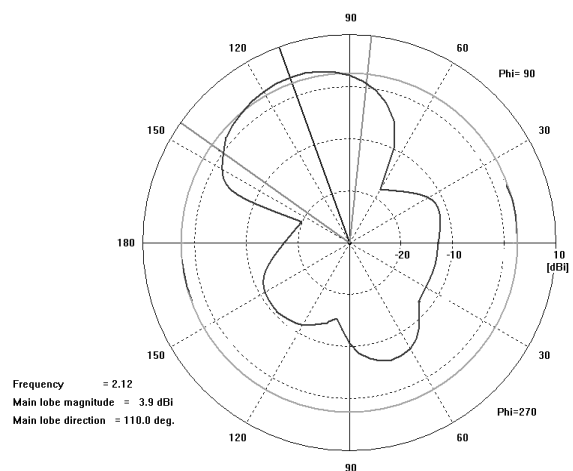


Рис. 6 – Диаграмма направленности возбуждителя в плоскости электрического вектора

Fig. 6 – The E-plane radiation pattern of the driver

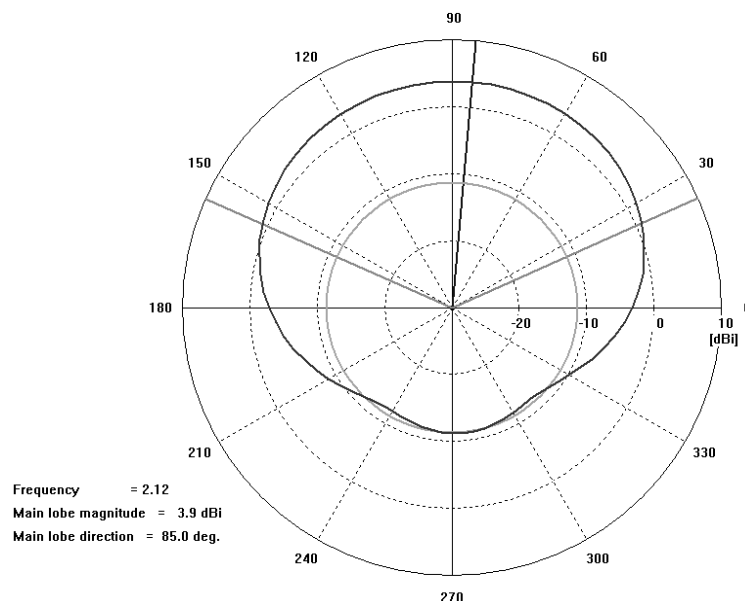


Рис. 7 – Диаграмма направленности возбуждателя в плоскости магнитного вектора

Fig. 7 – The H-plane radiation pattern of the driver

Заключение

Проведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования нового дипольного излучателя с центрально-концевым питанием свидетельствуют о его пригодности для реализации облучателей директорных антенн с отклоненным от нормали максимумом излучения. Это создает предпосылки для построения хорошо согласованных с питающим коаксиальным кабелем многолучевых директорных антенн, формирующих веер диаграмм направленности (лучей) с одной конструктивно-технологической сборочной единицы, что соответствует современным тенденциям в проектировании компактных антенн [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
2. Design of a multiband quasi-Yagi-Type antenna with CPW-to-CPS Transition / Y. Ding, Y.C. Jiao, P. Fei, B. Li, Q.T. Zhang // IEEE Antennas and Propagation Letters. – 2011. – Vol. 10. – P. 1120–1123.
3. A broadband planar quasi-Yagi antenna / N. Kaneda, W.R. Deal, Q. Yongxi, R. Waterhouse, T. Itoh // IEEE Transactions Antennas and Propagation. – 2002. – Vol. 50, N 8. – P. 1158–1160.
4. A multiband quasi-Yagi type antenna / S.-J. Wu, C.-H. Kang, K.-H. Chen, J.-H. Tarng // IEEE Transactions Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58, N 2. – P. 593–596.
5. Sar J., Qian Y., Itoh T. Coplanar waveguide fed quasi-Yagi antenna // Electronics Letters. – 2010. – Vol. 36, N 1. – P. 1/2.
6. Alhalabi R.A., Rebeiz G.M. Differentially-fed millimeter-wave Yagi-Uda antennas with folded dipole feed // IEEE Transactions Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58, N 3. – P. 966–969.
7. Лось В.Ф. Микрополосковые диэлектрические резонаторные антенны / под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: ИПРЖР, 2002. – 96 с.

8. **Чебышев В.В.** Микрополосковые антенны и решетки в слоистых средах. – М.: Радиотехника, 2003. – 104 с.
9. Заявка на выдачу патента № 2014110774. Вибраторная антенна / А.И. Борейчук, А.П. Горбачев, Н.А. Кириллова, А.В. Шведова. – Заявл. 24.03.2014.
10. **Горбачев А.П., Тарасенко Н.В.** Компактные и двухчастотные директорные антенны. – Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 146 с.
11. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
12. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
13. **Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р.** Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. – М.: Советское радио, 1972. – 112 с.
14. **Гальперович Д.Я., Павлов А.А., Хренков Н.Н.** Радиочастотные кабели. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
15. **Вендик О.Г., Парнес М.Д.** Антенны с электрическим сканированием / под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: Сайнс-Пресс, 2002. – 232 с.
16. **Kolundžija B.M., Ognjanovic J.S., Sarkar T.K.** WIPL-D microwave: circuit and 3D EM simulation for RF & microwave applications: software and user's manual. – Norwood: Artech House, 2005. – 388 p.
17. **Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А.** Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2013. – 208 с.

INVESTIGATION OF THE DIPOLE DRIVERS FOR MULTI-BEAM YAGI-UDA ANTENNAS

Gorbachev A.P., Shvedova A.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The novel driver for Yagi-Uda antennas is analyzed. Such the driver is the dipole-like antenna with so-called center-end-fed excitation. The driver element is characterized by an angle of deflection of a directional pattern maximum from a perpendicular to an axis of both collinear conductors. The presented driver gives the possibility to create the good match between Yagi-Uda antenna and energized coaxial cable and to realize the devices with various deviation the E-plane radiation pattern from the antenna axis. The expressions for driver's complex input impedance are obtained by using the induced electromotive force method. As a result of calculations, dependency diagrams of real and imaginary part of a complex input impedance of a dipole with central-end feed, from its relative length which are used for formation of starting shape of an exciter with a printing power divider for full-wave modeling and experimental research are constructed. The results of numerical modeling of driver's parameters are very close to the experimental ones. The proposed center-end-fed dipole driver may be used to excite the Yagi-Uda antennas as well as the phased array radars, turnstile antennas and so on.

Keywords: dipole, radiation pattern, Yagi-Uda antenna, complex input impedance, electromagnetic field.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-34-47

REFERENCES

1. Markov G.T., Sazonov D.M. *Antenny* [Antennas]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 528 p.
2. Ding Y., Jiao Y.C., Fei P., Li B., Zhang Q.T. Design of a multiband quasi-Yagi-type antenna with CPW-to-CPS transition. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, vol. 10, pp. 1120–1123.

3. Kaneda N., Deal W.R., Yongxi Q., Waterhouse R., Itoh T. A broadband planar quasi-Yagi antenna. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, 2002, vol. 50, no. 8, pp. 1158–1160.
4. Wu S.-J., Kang C.-H., Chen K.-H., Tarn J.-H. A multiband quasi-Yagi type antenna. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 2, pp. 593–596.
5. Sar J., Qian Y., Itoh T. Coplanar waveguide fed quasi-Yagi antenna. *Electronics Letters*, 2010, vol. 36, no. 1, pp. 1–2.
6. Alhalabi R.A., Rebeiz G.M. Differentially-fed millimeter-wave Yagi-Uda antennas with folded dipole feed. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 3, pp. 966–969.
7. Los' V.F. *Mikropoloskovye dielektricheskie rezonatornye anteny* [The microstrip dielectric resonator antennas]. Ed. by L.D. Bahrah. Moscow, IPRZhR Publ., 2002. 96 p.
8. Chebyshev V.V. *Mikropoloskovye anteny i reshetki v sloistyykh sredakh* [The microstrip antennas and arrays in the layered mediums]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 104 p.
9. Boreichuk A.I., Gorbachev A.P., Kirillova N.A., Shvedova A.V. *Vibratornaya antenna* [Dipole antenna]. Patent invention, no. 2014110774, 2014.
10. Gorbachev A.P., Tarasenko N.V. *Kompaktnye i dvukhchastotnye direktornye anteny* [Compact and dual-frequency Yagi-Uda antennas]. Saarbrücken, LAMBERT Academic Publishing, 2013. 146 p.
11. Voskresenskii D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. *Ustroystva SVCh i anteny* [The microwave devices and antennas]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 376 p.
12. Vol'man V.I., ed. *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv* [Handbook for design and implementation of microwave strip-line devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 328 p.
13. Maloratskii L.G., Yavich L.R. *Proektirovanie i raschet SVCh elementov na poloskovykh liniyakh* [Design of microwave components on a base of strip lines]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1972. 112 p.
14. Gal'perovich D.Ya., Pavlov A.A., Khrenkov N.N. *Radiochastotnye kabeli* [Radiofrequency cables]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1990. 256 p.
15. Vendik O.G., Parnes M.D. *Anteny s elektricheskimi skaniruyemyimi* [The electrically scanned antennas]. Ed. by L.D. Bahrah. Moscow, Sains-Press Publ., 2002. 232 p.
16. Kolundžija B.M., Ognjanovic J.S., Sarkar T.K. *WIPL-D microwave: circuit and 3D EM simulation for RF & microwave applications: software and user's manual*. Norwood, Artech House, 2005. 388 p.
17. Voskresenskii D.I., Ovchinnikova E.V., Shmachilin P.A. *Bortovye tsifrovye antennnye reshetki i ikh elementy* [The digital mobile antenna arrays and its elements]. Ed. by D.I. Voskresenskii. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 208 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Горбачев Анатолий Петрович – родился в 1951 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – фазированные антенные решетки. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 4. E-mail: apgor@ngs.ru).

Gorbachev Anatoly Petrovich (b. 1951) – Doctor of Sciences (Eng), Professor, Professor at the Radio receiving and Radio transmitting Devices Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on analysis and development of microwave systems, phased radar and passive microwave components. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, E-mail: apgor@ngs.ru).



Шведова Анна Владимировна – родилась в 1987 году. Аспирантка кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 4. E-mail: annsh21@mail.ru).

Shvedova Anna Vladimirovna (b. 1987) – PhD student of the Receiver and Radio Transmitter Devices Department in the Novosibirsk State Technical University. He is author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, E-mail: annsh21@mail.ru).

Статья поступила 01июня 2015 г.

Received June 01, 2015

To Reference:

Gorbachev A.P., Shvedova A.V. Issledovanie dipol'nykh vozbuditelei mnogoluchevykh direktornykh antenn [Investigation of the dipole drivers for multi-beam yagi-uda antennas]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 34–47. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-34-47