

Расчет характеристики направленности однопроводной антенны бегущей волны, развертываемой в арктических условиях

А. С. Леонюк, И. М. Душутин
Военная академия связи им. С. М. Буденного
leonuck@yandex.ru

Аннотация. an algorithm for calculating the directional characteristics of the traveling wave antenna located above the layered soil is proposed.

Ключевые слова: traveling wave antenna; directional characteristics; layered soil; finite difference time domain.

Огромные запасы углеводородов и оттаивающие глобальные транспортные маршруты вызывают повышенное внимание к Арктике со стороны влиятельных стран и межгосударственных союзов. Так, на севере Норвегии и в омывающих ее морях постоянно находятся подразделения НАТО. Являясь одним из основных общевойсковых тактических соединений, 80 отдельная мотострелковая бригада будет противостоять противнику в прогнозируемых условиях ведения военных действий в Арктическом регионе.

Основой системы связи *омсбр*, функционирующей при ведении боевых действий в условиях Заполярья, является, как и в обычных условиях, сеть радиосвязи. Степень выполнения задач, возложенных на сеть радиосвязи, определяется ее структурой и тактико-техническими возможностями используемых в ее составе средств и комплексов радиосвязи. Подразделения бригады оснащены радиостанциями средней мощности Р-166 и Р-166-0,5 из состава комплекса технических средств радиосвязи «Поиск-М». При выборе антенн для связи на заданную дальность принимают во внимание их следующие основные технические характеристики: диапазон частот; коэффициент усиления; характер диаграммы направленности. Подлежат учёту также и свойства окружающего пространства – проводимость почвы, состояние ионосферы, характер местности, электромагнитная обстановка вблизи антенн и др. Нижнее полупространство в зоне Островной Арктики на протяжении 9...10 месяцев в году представляет собой сложную систему, состоящую из снежного покрова и вечномерзлого грунта (рис. 1). Кроме того, Арктическое побережье славится сильными (ураганными) ветрами, скорость которых может достигать 40 м/с. Поэтому использование в Арктической зоне традиционных антенно-мачтовых устройств проблематично. В таких условиях важное место отводится разработке альтернативных мачтовым антеннам новых антенных устройств, обеспечивающих эффективное



Рис. 1. Почвенный профиль архипелага Новая Земля в зимний период

функционирование линий радиосвязи. Одним из вариантов таких антенных устройств являются безмачтовые антенны, расположенные непосредственно на подстилающей поверхности или на небольшой высоте от нее.

В ряде проволочных антенн для формирования нужной диаграммы направленности целесообразно применять провода с распределением тока в режиме бегущей волны. Такой режим может быть достигнут либо подключением на конце провода нагрузочного сопротивления, равного его волновому сопротивлению, либо при применении длинных в сравнении с длиной волны проводников, где за счет излучения создается близкое к режиму бегущей волны распределение тока [1]. Однопроводная антенна бегущей волны (ОАБВ) обладает большой направленностью, проста по конструкции и широко применяется для связи земными волнами на МВ, КВ, СВ и ДВ и ионосферными волнами на КВ. В данной статье произведен расчет характеристики направленности (ХН) компьютерной модели ОАБВ, расположенной на двухслойном подстилающем объеме, характерном для Арктической зоны, методом конечных разностей во временной области (КРВО). Физическая модель однопроводной антенны бегущей волны, размещенной в трехслойной среде, представлена на рис. 2.

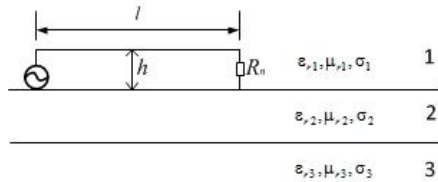


Рис. 2. Физическая модель однопроводной антенны бегущей волны, размещенной в трехслойной среде

Рассмотрим основные этапы алгоритма расчета ХН ОАБВ, построенного в программной среде matlab. В декартовой системе координат создается трехмерная расчетная область V , дискретизированная элементарными кубическими ячейками (рис. 3). Размеры расчетной области составляют: по оси ординат – 25 длин волн λ , по оси аппликат – 12 λ , по оси абсцисс – λ . Учитывая необходимость моделирования тонких слоев (снежный покров) относительно длины волны, оптимальным шагом дискретизации по пространству является шаг $d = \lambda / 40$. Расчетная область окружается идеально согласованными слоями (ИСС) для имитации ухода электромагнитной волны за пределы расчетной области конечных размеров [2]. Минимальная толщина ИСС составляет 15 кубических ячеек. После этого кубическими ячейками аппроксимируется антенна и слоистая среда ее размещения, и осуществляется ввод всех задействованных материалов с присвоением физических величин, характеризующих их свойства, объектам модели:

$$Material(m, p) = 1,$$

где m – порядковый номер материала; p – физическая величина, характеризующая свойства среды (материала).

Правая часть уравнения показывает численное значение данной физической величины. После того как будут заданы все материалы, производится присвоение характеризующих их физических величин объектам модели:

$$Index(I, J, K) = m,$$

где $Index(I, J, K)$ – массив $I \times J \times K$, равный по размеру и геометрической форме объекту, дискретизированному элементарными кубическими ячейками. Длина антенны $l = 60$ м, при шаге дискретизации $d = \lambda / 40$ и длине волны $\lambda = 30$ м соответствует 80 кубическим ячейкам. Толщина снежного покрова (среда с параметрами ϵ_2, σ_2) соизмерима с одной кубической ячейкой, среда с параметрами ϵ_3, σ_3 (мерзлота) является полубесконечным пространством в сочетании с ИСС. На границе раздела первой и второй сред кубической ячейке, имеющей по оси ординат координату, совпадающую с началом антенны, присваиваются электрические характеристики металла ($\sigma \rightarrow \infty$). Данной ячейкой аппроксимируется корпус радиостанции или противовеса. После аппроксимации объектов модели и присвоения характеризующих их физических величин осуществляется ввод физических констант: скорости света, абсолютной диэлектрической проницаемости, абсолютной магнитной проницаемости и расчетной длины волны.

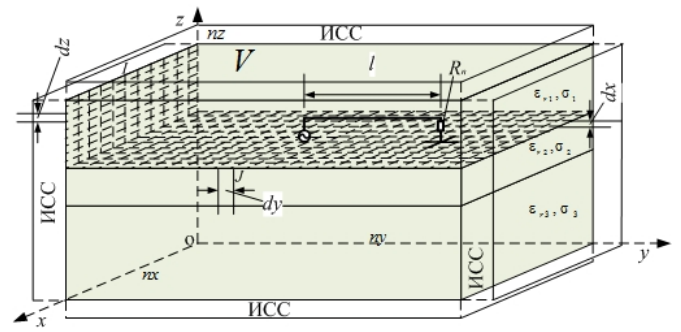


Рис. 3. Концептуальная модель однопроводной антенны бегущей волны, размещенной в трехслойной среде

Максимальное количество временных шагов выбирается таким, чтобы за этот интервал времени закончился переходный процесс излучения, а фронт волны успел распространиться на необходимое расстояние (не менее 10 длин волн). Математически выражается:

$$N_t \geq \frac{t_{\text{прх}}}{\Delta t},$$

где $t_{\text{прх}}$ – время, необходимое для завершения переходного процесса; Δt – величина шага временной дискретизации. Шаг временной дискретизации Δt выбирается согласно условию Куранта – Фридрихса – Леви.

Ячейке, являющейся началом антенны, присваивается функция возбуждения:

$$U = A \sin(2\pi f n \Delta t),$$

где n – номер временного шага; A – амплитуда входного воздействия; f – частота входного воздействия; Δt – величина временного шага. Метод КРВО оперирует значениями векторов напряженности электромагнитного поля \vec{E} и \vec{H} , поэтому напряжение задается через напряженность электрического поля:

$$U = -E_y^n(I, J, K) \Delta y,$$

где $E_y^n(I, J, K)$ – составляющая вектора напряженности электрического поля, параллельная проводу, образующему антенну.

Источник генерирует значение напряжения, выраженного через напряженность электрического поля в заданной ячейке на каждом временном шаге. Методом КРВО вычисляются значения составляющих векторов напряженности магнитного поля на текущем временном шаге n во всех ячейках расчетной области. Затем вычисляются значения составляющих векторов напряженности электрического поля во всех ячейках расчетной области на временном шаге $n + 1$ и т. д. Процесс вычислений повторяется и заканчивается при условии, если текущий временной шаг равен максимальному временному шагу.

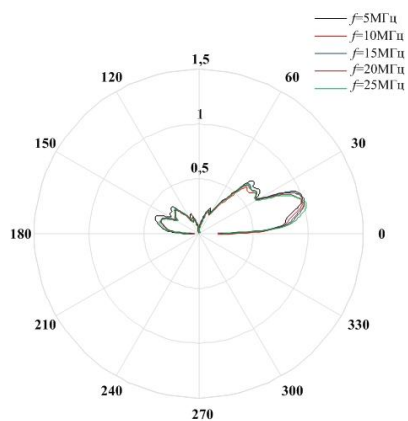


Рис. 4. Нормированные диаграммы направленности ОАБВ^{60/1}, расположенной над сухой почвой.

По окончании вычислений осуществляется переход из декартовой в полярную систему координат и на расстоянии $r = 10\lambda$ по рассчитанным значениям требуемой составляющей вектора напряженности электромагнитного поля строится диаграмма направленности (ДН).

В целях проверки адекватности разработанного алгоритма произведен расчет вертикальной составляющей вектора напряженности электрического поля E_z в дальней зоне, создаваемой однопроводной антенной бегущей волны ОАБВ^{60/1}, расположенной над сухой почвой с параметрами $\epsilon_r = 5$, $\sigma = 1 \cdot 10^{-3}$ См/м. Вычисления производились для следующих частот: $f = 5$ МГц, $f = 10$ МГц, $f = 15$ МГц, $f = 20$ МГц, $f = 25$ МГц. По результатам вычислений построены нормированные ДН в полярной системе координат.

Результаты, представленные на рис. 4, не противоречат теории. Угол максимального излучения θ незначительно уменьшается с ростом частоты. Уровень бокового излучения также уменьшается пропорционально росту частоты f , а форма ДН не претерпевает принципиальных изменений.

Произведен расчет вертикальной составляющей вектора напряженности электрического поля E_z в дальней зоне, создаваемой однопроводной антенной бегущей волны ОАБВ^{60/1}, расположенной над двухслойным подстилающим объемом (снежный покров и мерзлый грунт) с параметрами $\epsilon_{r1} = 1,2$, $\sigma_1 = 1 \cdot 10^{-6}$ См/м; $\epsilon_{r2} = 4,2$, $\sigma_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ См/м, соответствующими зимнему периоду в зоне Островной Арктики. Расчетные длины волн аналогичны предыдущему случаю. На рис. 5 представлены нормированные диаграммы направленности, построенные в полярной системе координат. Анализ полученных результатов показал существенное изменение формы диаграммы направленности ОАБВ при учете невидимого слоя подстилающего объема – мерзлого грунта. Во-первых, уменьшилась ширина ДН, во-вторых, более четко начала прослеживаться частотная зависимость формы диаграммы направленности, а также угла максимального излучения, значительно уменьшающегося с частотой.

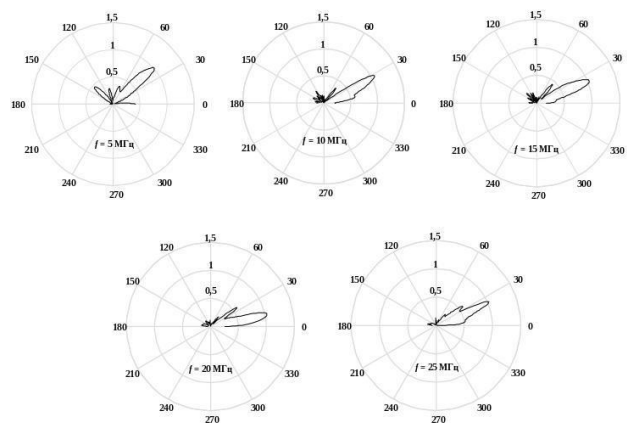


Рис. 5. Нормированные диаграммы направленности ОАБВ^{60/1}, расположенной над двухслойной почвой.

Однако, при $f = 25$ МГц угол максимального излучения снова увеличился, что выражено отражением ЭМВ от границ раздела сред и, как следствие, интерференцией прямых и отраженных волн. Наблюдается спад уровня боковых лепестков с ростом частоты, а затем, начиная с $f = 15$ МГц, он снова увеличивается.

ОАБВ быстро разворачивается в отличие от штатных антенно-мачтовых устройств радиостанции Р-166, что крайне важно в сложных климатических условиях. Вследствие близости к поверхности земли ОАБВ, в отличие от других направленных антенн, обладает интересной особенностью. При работе на передачу она излучает волны вертикальной поляризации, а при работе на прием реагирует на горизонтальную продольную составляющую вектора напряженности электрического поля, появляющуюся ввиду конечной проводимости подстилающей поверхности. Снежный покров и мерзлый грунт обладают слабой электропроводностью, что повышает эффективность ОАБВ, разворачиваемой в арктических условиях, наряду с простотой ее использования. Рассчитанные ХН ОАБВ в вертикальной плоскости показали возможность ее использования для радиосвязи ионосферной волной в КВ-диапазоне на дальности свыше 500 км. При этом высота подвеса модели ОАБВ составила всего порядка одного метра.

В дальнейшем возникает необходимость исследования остальных электрических характеристик ОАБВ, разворачиваемой в арктических условиях, а также возможности ее применения в более высокочастотных диапазонах для радиосвязи земной волной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Муравьев, Ю. К. Антенны / Ю. К. Муравьев, Н. П. Гавеля, А. Д. Истрашкин, В. П. Серков / под ред. Ю. К. Муравьева. – СПб.: ВАС, 1963. – 629
- [2] Berenger, J. P. Three-Dimensional Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves / J. P. Berenger // J. Comp. Phys. – 1996. – Vol. 127. – Pp. 363–379.