

Исследование широкополосных свойств трехлучевой стелющейся антенны, размещенной в слоистой среде Арктической зоны

Аннотация. Разработка аварийных быстроразвертываемых стелющихся антенн для коротковолновой радиосвязи в условиях Арктики является сложной задачей синтеза. Существуют различные подходы к синтезу антенн. Среди них можно выделить параметрический, структурно-параметрический и конструкционный синтез. В статье приводится один из способов параметрического синтеза трехлучевой стелющейся антенны, размещенной в слоистой среде и его результаты, представленные в виде графика зависимости коэффициента стоячей волны от изменяемых геометрических параметров трехлучевой стелющейся антенны.

Ключевые слова: конструкционный синтез, параметрический синтез, арктическая зона, трехлучевая стелющаяся антенна, коэффициент стоячей волны, входное сопротивление антенны.

Введение. Для ближней (примерно до 600 – 1000 км) коротковолновой радиосвязи пространственной волной широко применяются горизонтальные, а также наклонные и согнутые симметричные вибраторы. Использование традиционных антенно-мачтовых устройств в зоне Островной Арктики проблематично. Это связано с наличием в данной физико-географической области таких факторов природного характера, как сильные (ураганные) ветры, скорость которых может достигать 40 м/с, и промерзший на большую глубину грунт, структура которого вызывает трудности в развертывании антенно-мачтовых устройств военных радиостанций. В таких условиях важное место отводится разработке альтернативных мачтовым антеннам новых антенных устройств, обеспечивающих устойчивое функционирование линий радиосвязи. Одним из вариантов антенных устройств являются безмачтовые (стелющиеся) антенны, расположенные непосредственно на поверхности земли.

Среда распространения радиоволн состоит из верхнего и нижнего полупространств. Нижнее полупространство зоны Островной Арктики на протяжении 9...10 месяцев в

году представляет собой сложную систему, состоящую из снежного покрова, льда, вечномерзлого грунта и вызывающую затухание, ослабление и отражение распространяющихся в ней радиоволн от границ раздела сред. Поэтому под поверхностью земли будем понимать слоистый подстилающий объем, состоящий из снежного покрова и вечной мерзлоты.

Разработка быстроразвертываемых стелющихся антенн для КВ-радиосвязи в условиях Островной Арктики является сложной задачей синтеза. Существуют различные подходы к синтезу антенн. Среди них можно выделить параметрический, структурно-параметрический и конструкционный синтез [1].

Параметрический синтез (ПС) позволяет при заданной структуре проектируемой антенной системы подобрать значения параметров входящих в нее элементов, при которых характеристики системы будут находиться в заданных разработчиком пределах

При параметрическом синтезе стелющейся антенны, рассматриваемой в данной статье, необходимо учитывать влияние плоскостойких структур

(снежный покров, мерзлый грунт), в которые помещена антенна, на ее электродинамические характеристики. В качестве прототипа антенны выбрана штатная антенна радиостанции средней мощности Р-166 2ВНС 13/9, с некоторым отличием, выраженным в отсутствии мачты, к которой крепятся плечи антенны, поперечной перемычки (шунта), соединяющей два проводника и добавлении еще одного плеча. Концептуальная модель трехлучевой стелющейся антенны (ТСА) представлена на рис. 1.

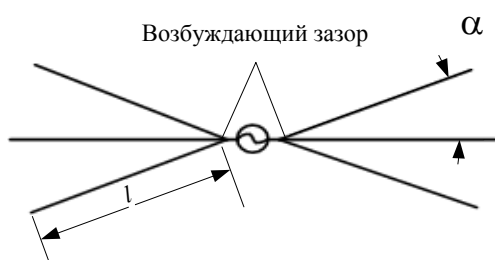


Рис. 1. Концептуальная модель трехлучевой стелющейся антенны

Рассмотрим основные этапы параметрического синтеза трехлучевой стелющейся антенны.

Выбор рабочей полосы частот. Будем руководствоваться диапазоном частот выбранной в качестве прототипа антенны, который составляет 5...15 МГц.

Определение допустимых габаритных размеров антенны. Длины плеч ТСА соответствуют длинам плеч 2ВНС 13/9.

Выбор численного метода. Расчет электрических характеристик ТСА целесообразно производить численным методом. Для этих целей воспользуемся методом конечных разностей во временной области (КРВО).

Определение критериев ПС. Критерием ПС выберем КСВ антенны. Ввиду особенностей размещения ТСА питание целесообразно осуществлять коаксиальным кабелем, изготавливаемым

промышленностью с волновым сопротивлением $\rho_{\phi} = 150 \text{ Ом}$. Потребуем, чтобы $\text{КСВ} \leq 2,5$ при $\rho_{\phi} = 150 \text{ Ом}$.

Ввод переменных и пределов их изменения. В качестве переменной ПС выберем угол между плечами антенны $\alpha = 27^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $\alpha = 63^\circ$. Величины углов продиктованы особенностями метода КРВО, заключающимися в разбиении расчетной области на кубические ячейки. Расчет КСВ целесообразно производить, предварительно определив входное сопротивление антенны.

Методика расчета входного сопротивления трехлучевой стелющейся антенны, размещенной в слоистой среде. Рассмотрим этапы предлагаемой методики.

1) *Введение исходных данных.* На данном этапе вводятся: частота входного сигнала f , его амплитуда A , число частотных отсчетов N_f , шаг по частоте Δf , длина плеч вибратора l , размеры трехмерной расчетной области, геометрические размеры слоев, в которых расположена антенна и физические константы (скорость света, абсолютная диэлектрическая проницаемость, абсолютная магнитная проницаемость).

2) *Расчет параметров модели возбуждения и определение приращений по времени.* Исходными данными являются амплитуда гармонического сигнала A и количество временных шагов в периоде колебания $N_{\text{ш}}$. Подлежат вычислению количество синусоид за время воздействия $N_{\text{sin}} = f / \Delta f$, максимальное число временных шагов $T_{\text{step}} = N_{\text{sin}} \cdot N_{\text{ш}}$, частота дискретизации сигнала $f_d = f \cdot N_{\text{ш}}$ и величина временного шага $\Delta t = 1 / f_d$. Число синусоид определяется в зависимости от времени, необходимого для достижения

установившегося режима, означающего синусоидальную повторяемость всех полей дискретизируемой области. Точность и устойчивость алгоритма пропорциональна количеству временных шагов в периоде колебания. Амплитуда гармонического сигнала A может быть произвольной.

3) *Вычисление параметров гармонического сигнала.* Данный этап необходим для установления соответствия между комплексными амплитудами, полученными после процедуры преобразования Фурье (ПФ) и заданной частотой входного воздействия. Определение порядка распределения частот в векторе дискретного Фурье-образа осуществляется при использовании частоты Найквиста, т. е. максимальной частоты в спектре сигнала, которая может быть представлена дискретным ПФ $\omega_n = \frac{1}{2} \cdot \Delta t$ [2]. Определение комплексной амплитуды искомой величины для заданной частоты сигнала происходит при учете, что первое значение в вычисляемом векторе Фурье-образа соответствует частоте $f = 0$ Гц. Таким образом, порядковый номер комплексной амплитуды в векторе дискретных значений будет равен:

$$n = \frac{f}{\Delta f} + 1.$$

4) *Определение приращений по пространству.* В трехмерной решетке для обеспечения пошаговой устойчивости алгоритма во времени, шаг временной дискретизации Δt выбирают согласно условию Куранта – Фридрихса – Леви: $\Delta x = \Delta t \cdot \sqrt{3} \cdot c$.

5) *Построение временной и сигнальной шкал:*

$$\left\{ t(i) = t(i-1) + \Delta t, i = 1, 2, \dots, T_{step} \right\},$$

где t – вектор значений временных шагов.

Источник возбуждения симметричного вибратора моделируется следующим образом:

$$s = A \cdot \sin(2\pi ft),$$

где A – амплитуда входного воздействия; f – частота входного воздействия.

6) *Автоматический ввод в алгоритм модели антенны в слоистой среде.* Согласно введенным геометрическим размерам сред, антенны, выбранным приращениям по пространству Δx , Δy и Δz аппроксимируется антенна в слоистой среде. В качестве антенны выбрана ТСА.

7) *Составление матрицы электрических параметров и присвоение их величин моделируемым средам.* На данном этапе осуществляется ввод параметров всех задействованных материалов и присвоение физических величин, характеризующих их свойства, объектам модели:

$$\text{Material}(m, p) = 1,$$

где m – порядковый номер материала; p – физическая величина, характеризующая свойства среды (материала); после знака равенства показано численное значение данной физической величины.

После того как будут заданы все материалы, производится присвоение характеризующих их физических величин объектам модели:

$$\text{Index}(I, J, K) = m,$$

где $\text{Index}(I, J, K)$ – массив размером $I \times J \times K$.

8) *Ввод идеально согласованных слоев.* Для имитации бесконечного полупространства, примыкающего к границам расчетной области, в методике использована техника формирования идеально согласованных слоев (ИСС), согласно которой каждая составляющая напряженности электромагнитного поля (ЭМП) разбивается на две компоненты [3].

9) *Модель возбуждения антенны.* Напряжение, прикладываемое к зажимам антенны U_A^T , выражается через напряженность электрического поля:

$$E_z^T(I, J, K) = s(T+1),$$

где $E_z^T(I, J, K)$ – вертикальная составляющая вектора напряженности электромагнитного поля в точке питания антенны, узле с координатами I, J, K ; s – источник синусоидального возбуждения; T – номер итерации (рис. 2);

$$U_A^T = -s(T+1) \cdot \Delta z,$$

где Δz – шаг дискретизации по пространству.

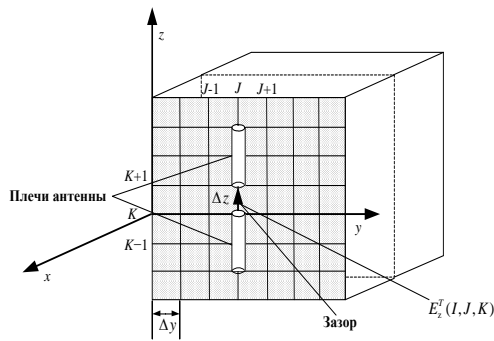


Рис. 2. Модель возбуждения антенны

10) *Расчет методом КРВО E и H составляющих напряженности ЭМП.* Методом КРВО вычисляются значения магнитных составляющих напряженности ЭМП ($H_x, B_x, H_y, B_y, H_z, B_z$) на текущем временном отсчете T во всей расчетной области. Далее методом КРВО вычисляются значения электрических составляющих напряженности ЭМП ($E_x, G_x, E_y, G_y, E_z, G_z$) во всей расчетной области на временном шаге $T+1$ с использованием обновленных значений $H_x, B_x, H_y, B_y, H_z, B_z$. Процесс вычислений повторяется и заканчивается при условии, если $T = T_{step}$. Вычисление методом конечных разностей во временной области всех составляющих в данном случае – решение задачи распространения электромагнитной волны.

11) *Вычисление $I_A(t)$.* Ток на зажимах симметричного вибратора определяется по закону Ампера в конечно-разностной форме [4], т. е. численным решением. Таким образом, получаем множество мгновенных значений тока на каждом временном шаге $T \{I_A^T, T = 1, 2, \dots, T_{step}\}$.

12) *ПФ полученных мгновенных значений тока и подводимого напряжения.* В рассматриваемом случае непрерывные функции $I_A(t)$ и $U_A(t)$ определены на интервале $[0, T_{step}]$, поэтому дискретным аналогом данных функций будем называть векторы $I_{Am} = I_A^T, T = 1, 2, \dots, T_{step}$ и $U_{Am} = U_A^T, T = 1, 2, \dots, T_{step}$. Результатом процедуры численного ПФ является вектор значений напряжения и тока в комплексном виде, т. е. $U_{Am} = F(U_A^T, T = 1, 2, \dots, T_{step})$, $I_{Am} = F(I_A^T, T = 1, 2, \dots, T_{step})$. Комплексные амплитуды тока и подводимого напряжения, соответствующие заданной частоте, определяются согласно пункту 3.

13) *Вычисление R_A и X_A .* Получив значения комплексных амплитуд тока и напряжения на зажимах вибратора, рассчитывают входное сопротивление

$$Z_A = \frac{U_{Am}}{I_{Am}}.$$

Заключение. По предложенной методике произведен расчет входного сопротивления ТСА с разными углами между плечами, размещенной в трехслойной среде (воздух, снежный покров и мерзлый грунт) с параметрами: $\epsilon_{r2} = 1,2$; $\sigma_2 = 1 \cdot 10^{-6}$ См/м и $\epsilon_{r3} = 4,2$; $\sigma_3 = 1 \cdot 10^{-4}$ См/м, соответствующими зимнему периоду в зоне Островной Арктики. Антенна располагалась на границе раздела воздуха и снежного

покрова. КСВ рассчитывается согласно

$$\text{выражению: КСВ} = \frac{1 + \left| \frac{R_A + iX_A - \rho_\phi}{R_A + iX_A + \rho_\phi} \right|}{1 - \left| \frac{R_A + iX_A - \rho_\phi}{R_A + iX_A + \rho_\phi} \right|}.$$

Результаты расчета КСВ представлены на рис. 3.

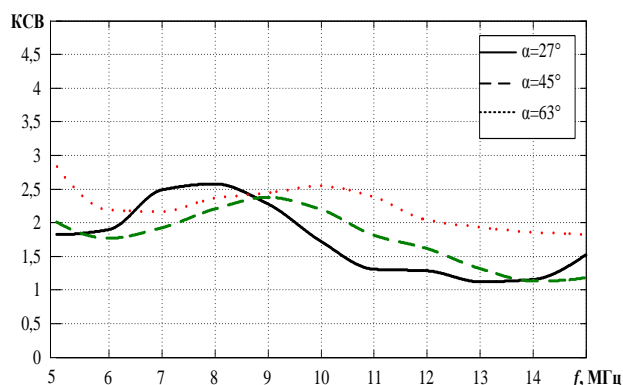


Рис. 3. Зависимость КСВ ТСА от частоты

Полученные результаты свидетельствуют о том, выбранная в качестве критерия характеристика КСВ находится в заданных пределах для исследуемого диапазона частот при угле между проводниками ТСА $\alpha = 45^\circ$. В качестве критерия могут быть использованы и другие электрические характеристики антенны, такие как, например, коэффициент усиления, коэффициент полезного действия. В дальнейшем предполагается изменять не только угол между проводниками, но и их длины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] THE PRINCIPLES OF ANTENNAS CONSTRUCTIVE SYNTHESIS IN DISSIPATIVE MEDIA *Borodulin R.U., Sosunov B.V., Makarov S.B.* Lecture Notes in Computer Science. 2017. Т. 10531 LNCS. С. 455-465.
- [2] Teukolsky, S. A. Press Numerical recipes in C. The Art of Scientific Computing/ S.A. Teukolsky, T. William// Cambridge: Cambridge University Press – s.l.: 2-nd edition, 2002.
- [3] 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.
- [4] Сальников, Д. В. Методика расчета входного сопротивления несимметричного вибратора методом КРВО/ Д. В. Сальников// Научно-технический сборник: сб. ст./ Труды академии/СПБ., 2005.