

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ АНТЕНН С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сидоров Я.Г.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, 14, каф. основ радиотехники, тел. (057) 702-14-30,
E-mail: yaroslav.sydorov@gmail.com, тел. (8057) 340-66-08

In the given report reconfigurable antennas mathematical model considering nonlinear characteristics of steering elements is proposed. This model allows to analyze this type of antennas considering nonlinear effects arising in them. It is shown, that the considering of steering elements specificity leads to simplification of the general model. The reconfigurable antenna element constitutive equations, allowing to define its nonlinear mode, are offered.

В последнее время в современных системах беспроводной связи наблюдается все больший интерес к реконфигурируемым антеннам [1]. Под реконфигурируемой антенной понимается устройство, в состав которого входят излучающая структура (ИС) и сосредоточенные элементы с управляемыми характеристиками, наличие которых позволяет изменять распределение тока в ИС и, как результат, характеристики антенны (входной импеданс, характеристику направленности, рабочую полосу частот и т.п.). Применение реконфигурируемых антенн предоставляет возможность существенного увеличения емкости сети связи, снижения межканальной интерференции из-за уменьшения излучаемой мощности, улучшения прохождения сигналов в каналах с замираниями. В результате, при разработке новых стандартов связи (например, IEEE 802.16-2004) предусматривается наличие встроенных средств поддержки таких антенн. Реконфигурируемые антенны также могут использоваться в качестве элементов адаптивных антенных решеток (ААР). На практике характеристики различных элементов ААР могут отличаться даже тогда, когда все антенные элементы идентичны и одинаково ориентированы в пространстве, например, при размещении ААР на подвижном объекте [2]. В данном случае различие характеристик направленности отдельных антенных элементов обусловлено разным влиянием поверхности объекта на различные антенные элементы, что приводит к ухудшению параметров антенной системы. Одним из возможных способов устранения данного эффекта является применение в качестве элементов ААР реконфигурируемых антенных элементов (РАЭ). РАЭ представляет собой излучающую структуру, в которую включены управляющие сосредоточенные элементы (как правило, переключатели), изменяя параметры которых можно варьировать распределением тока в излучающей системе тем самым изменяя электрическую конфигурацию АЭ и, следовательно, его характеристики [3].

Разработанные к настоящему времени модели РАЭ в большинстве своем представляют собой линейные модели, не учитывающие нелинейности характеристик переключающих элементов, которые оказывают существенное влияние на функционирование современных средств связи [4].

В данной работе предлагается нелинейная модель РАЭ, которая позволяет анализировать характеристики таких антенн с учетом возникающих в них нелинейных эффектов. Она основывается на модели антенн с нелинейными элементами (АНЭ), предложенной в [5,6]. Показано, что учет специфики РАЭ (непосредственное включение переключающих элементов в излучающую структуру и учет их нелинейных свойств) приводит к более простым моделям компонентов антенного элемента и, как результат, к упрощению общей модели АНЭ. Приводятся уравнения состояния РАЭ, позволяющие определить его нелинейный режим, и соотношения для определения параметров многополюсников, входящих в его схему.

Для исследования нелинейных эффектов в антеннах необходимо применять комплексный подход, учитывающий особенности схемы антенны с нелинейными элементами, параметры всех ее элементов, условия возбуждения антенны, т.е. антенна должна моделироваться совместно с нелинейными элементами (НЭ) как единое устройство с нелинейными характеристиками [6]. Целью анализа является определение спектрального со-

става отклика исследуемого устройства в зависимости от характера и уровня внешнего воздействия, характеризуемого вектором входных воздействий, компоненты которого в общем случае описывают возбуждение антенны как электромагнитным полем со стороны внешнего пространства, так и другими источниками (внешними генераторами). Отклик антенны характеризуют вектором выходных параметров, компонентами которого являются величины, описывающие связь антенны с пространством и внешними устройствами (приемниками, генераторами).

Общий подход к формированию математической модели РАЭ описан в [6]. Первым шагом при построении математической модели РАЭ является выбор его схемы, которая была бы пригодна для описания широкого круга реконфигурируемых антенн и возникающих в них нелинейных эффектов. Опишем обобщенную схему рассматриваемого нами приемного РАЭ (рис.1), учитывающую свойства нелинейных элементов, которыми в нашем случае являются переключающие элементы. В ней присутствуют линейная и нелинейная подсхемы. Линейная подсхема представляется в виде соединения трех блоков. В качестве первого блока выступает излучающая система. Во втором блоке объединены линейные элементы моделей переключающих элементов, входящих в нелинейную подсхему, и линейные элементы согласующих цепей, входящих в состав РАЭ. В третьем блоке объединены устройства, которые являются внешними по отношению к РАЭ. В нашем случае это полезная нагрузка, так как рассматривается приемная антенна. Нелинейной подсхеме и линейным блокам поставлены в соответствие некоторые многополюсники: нелинейной подсхеме – нелинейный многополюсник НМ, а излучающей системе, блоку линейных элементов РАЭ, блоку внешних устройств – линейные многополюсники ЛМ-1, ЛМ-2 и ЛМ-3 соответственно. Так как многополюсники ЛМ-1 и ЛМ-3 линейные, то режимы их входов и, соответственно, режимы соединяемых с ними входов линейного многополюсника ЛМ-2 целесообразно характеризовать в терминах падающих и отраженных волн. Количество входов ЛМ-3 зависит от числа линий, соединяющих выходы РАЭ с ЛМ-3, а также от числа типов колебаний, существующих в каждой из линий. Для нашего случая будем считать, что ЛМ-3 имеет один вход.

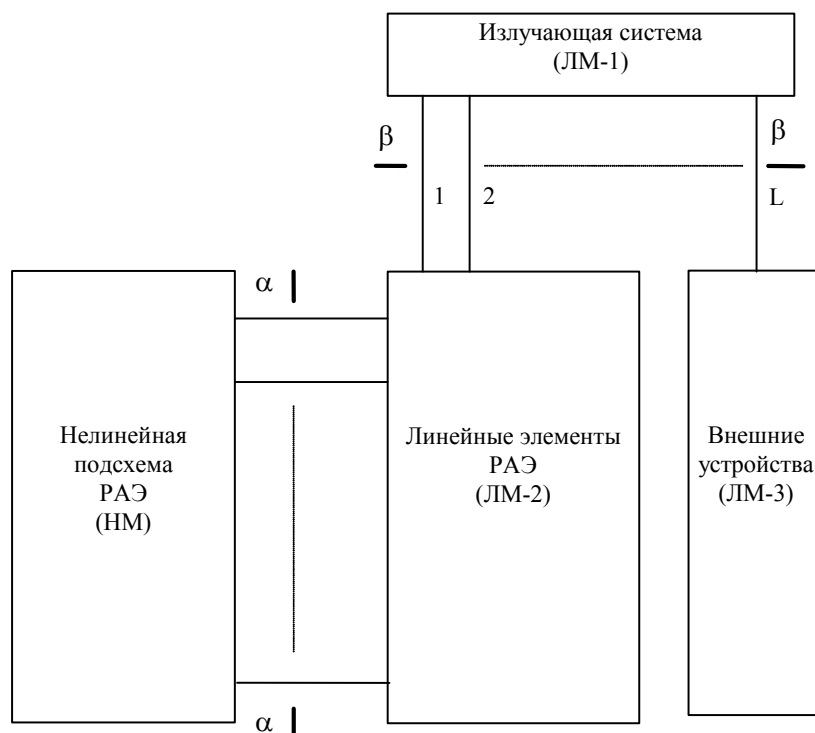


Рис. 1. Обобщенная схема реконфигурируемого антенного элемента совместно с внешними устройствами

Детальное описание нелинейного многополюсника изложено в [6]. Для нашего случая полагаем, что многополюсник нелинейных элементов представляет собой 2M-полюсник, режимы входов которого описываются во временной области векторами токов и напряжений. Внешние параметры НМ связаны между собой системой компонентных уравнений, которые описывают связь между ними в момент времени t .

Выбор и описание математической модели излучающей системы подробно рассмотрены в [6]. В соответствие излучающей системе поставлен многополюсник с 2L входами. Одна группа входов многополюсника характеризует связь излучателя со свободным пространством. В качестве второй группы входов многополюсника рассматриваются конкретные сечения линий передачи, соединяющих излучатель с остальной схемой РАЭ (многополюсниками ЛМ-2 и ЛМ-3). В качестве независимых переменных, характеризующих электрический режим на этих входах многополюсника, выбраны векторы комплексных амплитуд нормированных падающих и отраженных волн в линиях передачи. Далее следует соединить многополюсник ЛМ-1 с многополюсником нагрузок ЛМ-3. Для этого сечение $\beta - \beta$ разделяется на два сечения - $\beta' - \beta'$ и $\gamma - \gamma$. Сечение $\beta' - \beta'$ содержит $L - 1$ входов, соединяющих ЛМ-1 с ЛМ-2, а сечение $\gamma - \gamma$ - содержит один вход, соединяющий ЛМ-1 с ЛМ-3. Тогда модифицированную модель для сечения $\beta' - \beta'$ можно представить в виде

$$\begin{pmatrix} \mathbf{b}^{\beta'} \\ \mathbf{u}_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{\beta'\beta'} & \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{\beta'\delta} \\ \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{\delta\beta'} & \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{\delta\delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{a}^{\beta'} \\ \mathbf{u}_{mc} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Далее необходимо перейти от векторов комплексных амплитуд нормированных падающих и отраженных волн к векторам нормированных токов и напряжений. Для этого в сечении $\beta' - \beta'$ в рассмотрение вводится многополюсник, представляющий собой набор отрезков линий передачи нулевой длины, который описывается смешанной матрицей $\mathbf{Q}(\omega)$. Далее получим смешанную матрицу для системы, полученной в результате соединения модифицированного многополюсника излучающей системы, описываемого матрицей $\overline{\overline{\mathbf{S}}}$, и многополюсника, состоящего из отрезков линий передачи нулевой длины. Подробно методика определения такой матрицы описана в [6]. Так как токи и напряжения связаны между собой через матрицу сопротивлений, то полученное выражение можно представить в виде

$$\mathbf{u}^{\beta'} = \overline{\overline{\mathbf{Z}}}_{\beta'\beta'} \cdot \mathbf{i}^{\beta'} + \boldsymbol{\Psi}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \overline{\overline{\mathbf{Z}}}_{\beta'\beta'} &= (\mathbf{E} - \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{\beta'\beta'})^{-1} \cdot (\mathbf{E} + \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{\beta'\beta'}), \\ \boldsymbol{\Psi} &= (\mathbf{E} - \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{\beta'\beta'})^{-1} \cdot 2\overline{\overline{\mathbf{S}}}_{\beta'\delta} \mathbf{u}_{mc}. \end{aligned}$$

Далее подсоединим к системе многополюсник ЛМ-2 с размерностью $2N$, который описывает линейные элементы моделей переключающих элементов, входящих в нелинейную подсхему, и линейные элементы согласующих цепей, входящих в состав РАЭ. ЛМ-2 соединяется с нелинейным многополюсником в сечении $\alpha - \alpha$. Режимы групп входов многополюсника ЛМ-2 будем характеризовать векторами нормированных токов и напряжений. Он состоит из идентичных четырехполюсников и описывается матрицей импедансов \mathbf{Z}^S

$$\mathbf{Z}^S = \begin{bmatrix} \left\{ \mathbf{Z}_{\beta'\beta'}^S \right\} & \left\{ \mathbf{Z}_{\beta'\alpha}^S \right\} \\ \left\{ \mathbf{Z}_{\alpha\beta'}^S \right\} & \left\{ \mathbf{Z}_{\alpha\alpha}^S \right\} \end{bmatrix}.$$

В результате выражение (2) преобразуется к виду

$$\mathbf{u}^\alpha = \mathbf{Z}_{\alpha\alpha}^\Sigma \cdot \mathbf{i}^\alpha + \boldsymbol{\Psi}^\Sigma. \quad (3)$$

Соотношение (3) представляет собой полный закон Ома в матричной форме, из чего следует, что в данном случае \mathbf{Z} - это матрица собственных и взаимных сопротивлений

линейной подсхемы со стороны сечений $\alpha - \alpha$, а Ψ - вектор, описывающий источники ЭДС, пересчитанные к этим сечениям.

Представленные выше выражения позволяют перейти к составлению уравнений состояния. В дальнейшем они также могут быть использованы для расчета параметров РАЭ. Для получения уравнений состояния системы, представленной на рис.1, воспользуемся методикой, предложенной в [6]. В качестве переменной состояния выбирается $\mathbf{i}^\alpha(\omega)$. Связь между векторами $\mathbf{u}_{NL}^\alpha(t)$ и $\mathbf{i}_{NL}^\alpha(t)$ можно записать в виде

$$\mathbf{i}_{NL}^\alpha(t) = \Re\{\mathbf{u}_{NL}^\alpha(t)\}. \quad (4)$$

Преобразуем выражение (4) к более удобному виду:

$$\mathbf{i}^\alpha(t) + \Re\{\mathbf{u}^\alpha(t)\} = 0. \quad (5)$$

Если в качестве переменных состояния выбрать вектор $\mathbf{I}^\alpha(v_n)$, то уравнение состояния РАЭ во временной области имеет вид:

$$\mathbf{F}(\mathbf{I}^\alpha(v_n), t) = \sum_{n=-N}^N \delta_n \mathbf{I}^\alpha(v_n) e^{jv_n t} + \Re\left\{ \sum_{n=-N}^N \delta_n \tilde{\mathbf{Z}}_{\alpha\alpha}^\Sigma \mathbf{I}^\alpha(v_n) e^{jv_n t} + \Psi^\Sigma(t) \right\} = 0. \quad (6)$$

Решение этого уравнения позволяет найти переменные состояния и перейти к определению вектора выходных параметров РАЭ. Определим систему выходных уравнений РАЭ. Отклик РАЭ может зависеть от уровня входного воздействия, а также в нем могут содержаться новые частотные составляющие, так как в составе РАЭ присутствуют нелинейные элементы, что приводит к необходимости описания РАЭ большим числом параметров, чем традиционные антенны, которые являются линейными устройствами. Система выходных уравнений РАЭ в матричной форме имеет вид:

$$\begin{pmatrix} b_\gamma(v_n) \\ \mathbf{u}_r(v_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{z}_{\beta'\alpha}^T & \mathbf{z}_{\beta'\delta}^T \\ \mathbf{z}_{\delta\alpha}^\Sigma & \mathbf{z}_{\delta\delta}^\Sigma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{i}^\alpha(v_n) \\ \mathbf{u}_{inc}(\omega_k) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Это соотношение является матричной записью системы выходных уравнений и описывает реакцию РАЭ в сечениях $\gamma - \gamma$ и $\delta - \delta$ на заданные входные воздействия.

Таким образом, для предложенной нелинейной модели РАЭ, учитывающей свойства переключающих элементов, получены уравнения состояния, позволяющие определить его нелинейный режим, и соотношения для определения параметров многополюсников, входящих в его схему.

Литература

1. Ягофаров Т. IDF Spring 2007: репортаж из столицы Подне-бесной // Компьютерное Обозрение. 2007. № 17-18 (586). С. 24-39.
2. Марчук Л.А. Пространственно-временная обработка сигналов в линиях радиосвязи. ВАС.- 1991. – 136 с.
3. Huff G.H., Feng J., Zhang S., Cung G., Bernard J.T. Directional Reconfigurable Antennas on Laptop Computers: Simulation, Measurement and Evaluation of Candidate Integration Positions // IEEE Trans. on AP. – 2004. – Vol. 52. – No. 12. – pp. 3220-3227.
4. RF Technologies for Low Power Wireless Communications // Ed. by T.Itoh, G.Haddad, J.Harvey. – N.Y.: J. Willey & Sons, 2001. – 468 p.
5. Шифрин Я.С., Лучанинов А.И. Антенны с нелинейными элементами. – Глава 10 в кн. Справочник по антенной технике // Под ред. Л.Д.Бахраха и Е.Г. Зелкина. – М.: ИПРЖР, 1997. – с. 207-234.
6. Лучанинов А. И., Шифрин Я. С. Математическая модель антенны с сосредоточенными нелинейными элементами // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 9. С. 3-21.