

УДК 004.8:621.396.67(045)

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-4-94-99

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ
ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОЕКТИРОВАНИИ И РАБОТЕ
СИСТЕМ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

А. А. Жиленков, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург Россия

С. Г. Черный, кандидат технических наук, доцент, Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия

Методы, используемые при синтезе антенных решеток, варьируются от сложных аналитических методов до итерационных численных методов, основанных на алгоритмах оптимизации. Недостаток данных методов заключается в том, что они обычно учитывают множитель решетки, а не взаимное влияние между ее элементами и проблемами, наблюдаемыми в реальном времени.

Данное упрощение вызывает ошибку в результирующей диаграмме направленности излучения, следовательно, для повышения точности расчетов и моделей должны приниматься во внимание физические отношения между параметрами фазированной решетки и соответствующими диаграммами направленности.

Поведение антенной решетки нелинейно по своей природе, что приводит к чрезвычайно высокой сложности при его моделировании и обычно не учитывается.

Моделирование с применением искусственных нейронных сетей может устранить указанные сложности, аппроксимируя связи между желаемыми диаграммами направленности и параметрами питания элементов решетки, напряжением на элементах и расстоянием между ними в реальной антенной решетке.

Применение ИНС может помочь преобразовать антенную решетку в интеллектуальную решетку. В данной статье рассматриваются несколько приложений нейронных сетей для синтеза интеллектуальных антенных решеток и интеллектуального синтеза активных фазированных антенных решеток.

Ключевые слова: фазированный, решетка, искусственный интеллект, антенна, машинное обучение, модель.

Введение

В активных фазированных антенных решетках [1, 2] используется фиксированный набор антенных элементов, сигналы которых, суммируясь, формируют подвижную диаграмму направленности, которая может быть направлена к цели.

Эта характеристика делает антенну «умной», сводит к минимуму влияние шума, помех и снимает ряд других проблем, приводящих к ухудшению качества сигнала. Сегодня ожидается, что внедрение технологий интеллектуальных антенн в будущих беспроводных системах окажет значительное влияние на эффективное использование спектра, минимизацию затрат на создание новых беспроводных сетей, оптимизацию качества обслуживания и реализацию прозрачной работы в высокотехнологичных беспроводных сетях [3–6].

Концепция интеллектуальных антенн состоит в том, чтобы использовать диаграммы направленности базовой станции, которые не являются фиксированными, но адаптируются к текущим условиям канала связи. Технологии интеллектуальных антенных систем включают интеллектуальную динамическую фазированную решетку, цифровое формирование луча, адаптивные антенные системы [7, 8].

Высокие скорости обработки информации и способность к обучению искусственных нейронных сетей (ИНС) могут применяться для решения многочисленных сложных задач оптимизации в антенных решетках. Присущие нелинейности, связанные с диаграммами направленности антенн, делают антенны

подходящими кандидатами для обработки их сигналов средствами ИНС.

Использование ИНС также перспективно в решении проблем в проектировании фазированных антенных решеток [9].

Целью настоящей публикации является обзор существующих и перспективных применений технологий искусственного интеллекта в проектировании и работе систем фазированных антенных решеток, направленный на поиск путей улучшения конструкций, новых принципов функционирования, алгоритмов и усовершенствования систем управления активными фазированными антенными решетками.

Поиск неисправностей в антенных решетках

Компенсация потери элементов решетки. Антенные решетки, используемые в сонарах, радарх и других приложениях связи, содержат несколько сотен излучающих элементов, поэтому отказ одного или нескольких элементов является в достаточной степени вероятным событием и в случае возникновения такого отказа он должен быть устранен. Отказ элемента в антенных решетках нарушает симметрию и вызывает недопустимое искажение диаграммы направленности. Данная проблема может быть решена путем замены неисправных элементов в авиационных антеннах, но остается критической проблемой в космических и подводных установках. В литературе [10, 11] были описаны несколько методов компенсации потери функционирующих элементов решетки. Данные методы компенсации применимы при условии, что доступна информация о количестве и положении неисправных элементов.

Проблема поиска неисправных элементов. Активные антенны включают в себя системы калибровки для выявления поврежденного элемента или элементов. Эти системы обеспечивают простой способ управления компонентами комплекса АФАР, но такой контроль не возможен, если система калибровки также повреждена. Теоретически такая проблема может быть решена с помощью многослойного перцептрона (МСП), обученного с использованием алгоритма обратного распространения [12, 13]. Отказы элементов приводят к резким колебаниям напряженности поля через апертуру массива, увеличивая как боковые лепестки, так и уровень пульсаций мощности. Рассматривая влияние на систему неисправного элемента, количество и размер боковых лепестков и диаграмма направленности являются функцией количества и положения неисправных элементов в массиве. При таком подходе неисправные элементы рассматриваются как полностью неизлучающие, но, очевидно, наличие неисправного элемента в решетке оказывает свое влияние на общую диаграмму направленности. С увеличением количества неисправных элементов изменение диаграммы направленно-

сти также увеличивается. Задача здесь состоит в том, чтобы создать отображение между искаженными диаграммами направленности и соответствующим расположением неисправных элементов в массиве.

Умные антенные решетки на основе искусственной нейронной сети с обучением на основе радиальных базисных функций

Искусственная нейронная сеть с обучением на основе радиальных базисных функций ИНС-РБФ является универсальным методом аппроксимации нелинейных отображений. Нейроны РБФ могут обучаться быстрее, чем в МСП, благодаря применению двухступенчатой процедуры обучения. ИНС-РБФ может быть обучена с учителем и без него и в теории обеспечивает отличные результаты при моделировании препятствий, определении направления на источник сигнала (НИС) и формировании луча АФАР. В отличие от сетей обратного распространения, которые можно рассматривать как приложение задачи оптимизации, ИНС-РБФ можно рассматривать как средство аппроксимации функции в многомерном пространстве. В табл. 1 обобщены известные на сегодня применения ИНС-РБФ в антенных решетках.

Таблица 1. Различные применения ИНС-РБФ в системах АФАР

Применение	Обучение	Число нейронов
Цифровое формирование луча	Алгоритм поиска k средних	200
Детектирование сигнала и определение НИС	Н-СНС	72, 156
Поиск НИС	Применение алгоритма минимизации среднеквадратичной ошибки (МНК)	–
Моделирование препятствий	Алгоритм поиска k средних	Количество входов вдвое превышает количество выборок распределения излучаемого поля
Определение поврежденных элементов решетки	Метод обратного распространения ошибки	50–100

Моделирование препятствий в процессе синтеза массивов

На практике, излучающие системы не работают в условиях свободного пространства. Препятствия, окружающая среда или механическая структура антенны могут изменять ее свойства, так что результаты процесса синтеза не полностью соответствуют модели. Прямой способ учесть этот эффект – создать модель излучающей системы, работающую в режиме реального времени. Чтобы компенсировать влияние препятствия на диаграмму направленности, генерируемую антенной, необходимо учитывать эффекты взаимного влияния между элементами излучающей структуры, а также между структурой и препятствиями. Эти эффекты взаимного влияния не могут быть смоделированы с использованием традиционных методов синтеза, в том числе основанных на идеальных возбуждениях или коэффициентах массива. Традиционные подходы к синтезу основаны на различных приближениях, таких как множитель антенной решетки, которые подразумевают отсутствие взаимодействия между излучающими элементами. В реальной излучающей системе эффекты взаимного влияния между элементами решетки изменяют их индивидуальные радиационные свойства и, следова-

тельно, глобальную диаграмму направленности. Если эти эффекты не учитываются, в модели возникают ошибки.

Аппроксимировать такую модель может ИНС, благодаря своей способности подстраивать свои внутренние параметры на основании набора известных пар вход-выход. ИНС оптимизирует веса между своими нейронами в процессе обучения. Как только успешно будет завершено обучение, сеть сможет интерполировать результаты для различных входных данных. Эта способность ИНС может использоваться для связи набора напряжений, приложенных к портам антенной решетки, и результирующего распределения излучаемого поля.

Хотя обе структуры, как МСП, так и РБФ, являются универсальными аппроксиматорами, локальный отклик нейронов в ИНС-РБФ делает его более подходящим для задачи синтеза антенных решеток. Теоретически, МСП должен иметь возможность выполнять синтез с той же точностью, что и РБФ, при условии достаточного количества нейронов, но на практике слишком большое число нейронов во многих приложениях может быть непрактичным и нерентабельным.

Как только структура сети выбрана, должно быть определено число нейронов в слоях сети. Хотя существует ряд правил для выбора количества нейронов в слоях ИНС, ни одно из них не является универсальным, и только экспериментальная проверка результатов синтеза может обеспечить желаемую точность.

В [14] предложен метод синтеза антенной решетки на основе ИНС, позволяющий идентифицировать напряжения, которые должны быть приложены к элементам решетки, с учетом эффектов взаимного влияния между элементами и наличия ближайшего препятствия.

Синтез антенной решетки с учетом эффекта взаимной связи ее элементов

Традиционные методы синтеза антенных решеток, как правило, используют информацию о множителях решетки с применением подходов, основанных на описании идеальных излучающих элементов без учета эффектов взаимного влияния между ними. Учет взаимного влияния между элементами антенной решетки увеличивает сложность задач синтеза, поэтому обычно не реализуется, приводя к появлению ошибки в решении. Эта ошибка может быть неприемлемой в ряде конструкций антенных решеток. Решение задачи синтеза на основе ИНС может использовать «априорные» знания об излучающей системе, чтобы связать данное распределение излучаемого поля с напряжениями, которые должны быть приложены к каждому излучающему элементу, принимая во внимание эффекты взаимной связи между элементами без увеличения сложности с точки зрения проектировщика.

Задача синтеза в конструкции решетки состоит в нахождении распределения возбуждения антенных элементов для данной диаграммы направленности с заданными характеристиками. Если в качестве задачи анализа рассматривается расчет диаграммы направленности излучения по заданному закону возбуждения с использованием аналитических или численных инструментов, то задачу синтеза можно считать обратной задачей анализа, то есть вычислением распределения возбуждения, которое генерирует данное поле распределения. Элементарные антенны, используемые в решетках в качестве излучающих элементов, демонстрируют различные эффекты взаимной связи в зависимости от их геометрии и разнесения, так что каждый элемент индуцирует токи в других, изменяя их индивидуальную диаграмму направленности и их вклад в глобальное распределение излучаемого поля.

Традиционные подходы к проблеме синтеза обычно основаны на прямом анализе набора коэффициентов из множителя решетки или других аналитических представлений о диаграмме направленности [15]. В других современных методах используются функции стоимости, включающие желаемую диаграмму поля и поле, выраженное через коэффициент решетки или интегральные уравнения, включая эквивалентные токи на поверхности, «охватывающей» антенну. Преимущество использования этого типа функции стоимости состоит в том, что

она позволяет включать дополнительные ограничения.

Некоторые методы регуляризации и оптимизации предложены в [16] для улучшения плохо обусловленного поведения численного решения функции стоимости и для получения точной оценки закона возбуждения посредством его минимизации. При определенных обстоятельствах значения коэффициентов решетки можно считать пропорциональными или напрямую связанными с напряжениями, которые должны быть приложены к портам решетки, без учета эффектов взаимосвязи между элементами, помещенными в решетку, но это приближение предполагает появление определенной ошибки в модели, которая недопустима в ряде приложений. Инструмент синтеза на основе ИНС может избежать указанных проблем, принимая во внимание эффекты взаимной связи и реальные радиационные свойства исследуемой структуры без какого-либо увеличения сложности с точки зрения проектировщика.

В [17, 18] предложен набор различных методов синтеза решеток на основе ИНС с радиальными базисными функциями активации, учитывающих взаимную связь между элементами и использующих различные методы спецификации паттерна решетки (амплитуда и фаза, только амплитуда, данные, основанные на шаблонах спецификации).

Интеллектуальные антенные решетки на основе ИНС Хопфилда

Архитектура ИНС Хопфилда (ИНСХ) представляет собой однослойную, полносвязную ИНС с симметричными связями. Данная ИНС имеет связанную энергетическую функцию, которую сеть стремится минимизировать. Такая функция может быть использована для решения задач оптимизации, таких как минимизация между опорным сигналом и принятым сигналом. ИНСХ была использована для реализации адаптивного формирования и отслеживания луча. Сравнение производительности алгоритма Хопфилда и алгоритма МНК показывает, что формирователь луча Хопфилда превосходит классический алгоритм МНК с точки зрения скорости сходимости.

Система слежения с помощью фазированной антенной решетки на базе ИНСХ

Оценка состояния на основе сети Хопфилда может использоваться для построения системы слежения с помощью фазированной решетки. Система слежения на базе ИНС использует динамическую оптимизацию для последовательной оценки состояния системы и не требует предварительной статистической информации о шуме. Время обновления также может меняться случайным образом в зависимости от действий оператора, чего нельзя достичь с помощью РЛС сопровождения целей в режиме сканирования из-за их серьезных ограничений по механической инерции. Поэтому более целесообразно включить переменное время обновления в алгоритм отслеживания целей с помощью фазированной решетки. Система оценки состояния на базе ИНСХ для фазированной решетки обеспечивает превосходные

результаты при использовании концепции времени обновления комбинированной переменной.

Адаптивное формирование луча с расширением спектра по методу прямой последовательности

Адаптивное формирование луча является надежным средством улучшения приема желаемого сигнала и защиты систем связи от помеховых сигналов. Этот метод включает в себя формирование множества лучей, при этом основной луч направляется в сторону желаемого сигнала, другие лучи – в направлении помеховых сигналов, а нулевые – в направлении помеховых сигналов. Это достигается путем взвешивания каждого принятого сигнала в соответствии с адаптивным алгоритмом. Когда такой метод связан с системой с расширенным спектром, он обладает большими возможностями в подавлении нежелательных сигналов, чем классический формирователь луча.

ИНСХ может использоваться для адаптивного формирования луча с использованием сигналов с расширенным спектром прямой последовательности. При этом для получения требуемого сигнала в адаптивном процессоре используется генератор опорных сигналов.

Псевдосумовой код используется для расширения сигнала данных, модулированного по фазе. На стороне приемника этот код используется для извлечения требуемого компонента сигнала из выходного сигнала массива и режекции любых узкополосных помеховых сигналов.

Литература, посвященная системам беспроводной связи, изобилует адаптивными алгоритмами формирования луча. Применение их совместно с ИНС может обеспечить очень привлекательные решения сложных проблем из-за сильно взаимосвязанной структуры, вычислительной эффективности и быстрой сходимости выхода последних.

Сеть Хопфилда использовалась в [19, 20] для реализации адаптивного формирования луча для системы связи с расширенным спектром. Формирователь луча на базе ИНСХ также может быть интегрирован в систему с расширенным спектром наряду с генератором опорного сигнала. Эта система обеспечивает автоматическое отслеживание желаемого сигнала и подавление сигналов помехи.

Количественные характеристики

Если судить по открытым источникам, то на сегодня применение нейросетевых технологий и машинного обучения в проектировании и организации работы систем АФАР находятся на экспериментальном уровне. Необходимо заметить, что, как правило, детали и характеристики методов проектирования, а также сами тактико-технические характеристики АФАР, в особенности в перспективных разработках, не фигурируют в открытых источниках.

Имеющиеся на сегодня данные показывают преимущества рассмотренных выше методов и средств. Так, исследования в рамках программы DARPA продемонстрировали, что применение нейросетевых вычислителей обеспечивает адаптацию системы формирования диаграммы направленности решетки

к ее параметрам и в принципе снимает необходимость обеспечения встроенного контроля и калибровки параметров антенны. При этом было достигнуто 12%-е повышение точности системы.

Экспериментальные образцы Roke Manor Research продемонстрировали повышение достоверности в среднем на 23 %. Кроме того, была обеспечена возможность ориентирования «нулей» диаграммы направленности в направлении источников помех, с улучшением избирательности лучей.

Шведские специалисты показали значительное улучшение в части компенсации амплитудных и фазовых вариаций между элементами, возникающих при работе в широком угловом секторе и в широкой полосе частот. Так, было показано, что предложенные методы адаптивного формирования обеспечили сниженное с +1 до +0,1 дБ изменение коэффициента усиления в угловом секторе, происходящее из-за взаимного влияния элементов решетки, а изменение того же параметра в полосе частот 5 МГц – с 0,5 до 0,05 дБ.

Недавние летные испытания бортовой радиолокационной системы L-диапазона, спроектированной с применением описанных выше методов, в состав которой входит адаптивный процессор пространственно-временной обработки сигналов, продемонстрировала подавление помех от 52 до 69 дБ, что в совокупности с достигнутой точностью направленности луча показало наилучшие тактико-технические характеристики в сравнении с существующими функциональными аналогами.

Выводы

Приведенный обзор существующих на сегодня решений и исследований показывает, что методы и средства управления системами с фазированными антенными решетками с применением когнитивных технологий и машинного обучения показывают более высокую точность и быстродействие в сравнении с традиционными методами, основанными на линейной алгебре. Данный эффект объясняется тем, что, например, ИНС позволяют учитывать изменения свойств системы в реальном времени, тогда как традиционные методы используют только механизм коэффициентов решетки, упрощенные модели и т. п.

Настоящий обзор показывает, что на базе моделей МСП, РБФ, ИНСХ и гибридных В-ИНС или ИНС-ГА могут быть построены интеллектуальные антенные решетки, значительно превосходящие по целому ряду параметров существующие сегодня решения.

Показано, что МСП ИНС могут применяться для построения систем идентификации и локализации неисправностей, оценки НИС и подавления сигналов источников помех. В то же время ИНС-РБФ эффективны при моделировании препятствий, оценки НИС, цифрового формирования луча и обнаружения дефектных элементов.

Обзор показывает, что для эффективного решения задач оптимизации конструкции и для реализации систем слежения и адаптивного формирования луча с улучшенными характеристиками может использоваться метод ИНСХ.

Библиографические ссылки

1. Базулин Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51–75.
2. Мазный А. Г. Диагностика и калибровка многоэлементной фазированной антенной решетки // Гагаринские чтения – 2019 : сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 2019. С. 494.
3. Легкий Н. М., Унченко И. В. Формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2 (28). С. 29–38.
4. Андреев В. Ф. Активная фазированная антенная решетка : патент на полезную модель RUS 91653 22.10.2009.
5. Chryssomallis M. Smart antennas // IEEE Antenna Propagation Mag 2000. pp. 129-36.
6. Zhang Jian-Wu. The adaptive algorithms of the smart antenna system in future mobile telecommunication systems // IEEE Int Workshop Antenna Technol, 2005. Pp. 347-50.
7. Lehne P.H., Pettersen M., Telenor A. An overview of smart antenna technology for mobile communications systems // IEEE Commun Surv, 1999.
8. Christodoulou C., Georgiopoulos M. Applications of neural networks in electromagnetics // Boston: Artech House Inc.; 2001.
9. Janaswamy Ramakrishna. Radio wave propagation and smart antennas for wireless communications // Kluwer Academic, 2002.
10. Al-Bajari M, Ahmed JM, Ayoob MB. Performance evaluation of an artificial neural network-based adaptive antenna array system // Lecture Notes Comput Sci 2010, 2. Pp. 11-20.
11. Yeo BK, Lu Y. Array failure correction with a genetic algorithm // IEEE Trans Antenna Propagation 1999.47. Pp. 823-8.
12. Rodriguez J.A., Fernandez-Delgado M., Bregains J. A comparison among several techniques for finding defective elements in antenna array // EUCAP the second European conference on antenna and propagation. 2007. Pp. 1-8.
13. Patnaik A, Choudhury B, Pradhan P, Mishra RK, Christodoulou C. An ANN application for fault finding in antenna arrays // IEEE Trans Antenna Propagation 2007. 55. Pp. 775-7.
14. Haykins S. Neural networks: A comprehensive foundation. New York: IEEE Press/IEEE Computer Society Press, 1994.
15. Rafael G., Las Heras Fernando, Luis F Herrán. Neural modelling of mutual coupling for antenna array synthesis // IEEE Trans Antenna Propagation, 2007. 55. Pp. 832-40.
16. Yeo BK, Lu Y. Array failure correction with a genetic algorithm // IEEE Trans Antenna Propagation 1999.47. Pp. 823-8.
17. Al-Bajari M, Ahmed JM, Ayoob MB. Performance evaluation of an artificial neural network-based adaptive antenna array system // Lecture Notes Comput Sci 2010, 2. Pp. 11-20.
18. Haykins S. Neural networks: A comprehensive foundation. New York: IEEE Press/IEEE Computer Society Press, 1994.
19. Ibid.
20. Rafael G., Las Heras Fernando, Luis F Herrán. Neural modelling of mutual coupling for antenna array synthesis // IEEE Trans Antenna Propagation, 2007. 55. Pp. 832-40.

References

1. Bazulin E.G. [Comparison of systems for ultrasonic non-destructive testing using antenna arrays or phased antenna arrays]. *Defektoskopija*. 2013. No. 7. Pp. 51-75 (in Russ.).
2. Maznyj A.G. *Diagnostika i kalibrovka mnogojelementnoj fazirovannoj antennoj reshetki* [Diagnostics and calibration of a multi-element phased array antenna]. *Gagarinskie chtenija - 2019 Sbornik tezisev dokladov XLV Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii. Moskovskij aviacionnyj institut (nacional'nyj issledovatel'skij universitet)* [Proc. Gagarin Readings - 2019: Collection of Abstracts of the XLV International Youth Scientific Conference. Moscow Aviation Institute (National Research University)]. Moscow, 2019. P. 494 (in Russ.).
3. Legkij N.M., Unchenko I.V. [Radiation pattern formation in phased array antennas]. *Rossijskij tehnologicheskij zhurnal*. 2019. Vol. 7. No. 2. Pp. 29-38 (in Russ.).
4. Andreev V.F. Aktivnaja fazirovannaja antennaja reshetka : patent na poleznuju model' RUS 91653 22.10.2009 [Active Phased Array: Utility Model Patent].
5. Chryssomallis M. Smart antennas. In IEEE Antenna Propagation Mag 2000. Pp. 129-36.
6. Zhang Jian-Wu. The adaptive algorithms of the smart antenna system in future mobile telecommunication systems. In IEEE Int Workshop Antenna Technol, 2005. Pp. 347-50.
7. Lehne P.H., Pettersen M., Telenor A. An overview of smart antenna technology for mobile communications systems. In IEEE Commun Surv, 1999.
8. Christodoulou C., Georgiopoulos M. Applications of neural networks in electromagnetics. In Boston: Artech House Inc.; 2001.
9. Janaswamy Ramakrishna. Radio wave propagation and smart antennas for wireless communications. In Kluwer Academic, 2002.
10. Al-Bajari M, Ahmed JM, Ayoob MB. Performance evaluation of an artificial neural network-based adaptive antenna array system. In Lecture Notes Comput Sci 2010, 2. Pp. 11-20.
11. Yeo BK, Lu Y. Array failure correction with a genetic algorithm. In IEEE Trans Antenna Propagation 1999.47. Pp. 823-8.
12. Rodriguez J.A., Fernandez-Delgado M., Bregains J. A comparison among several techniques for finding defective elements in antenna array. In EUCAP the second European conference on antenna and propagation. 2007. Pp. 1-8.
13. Patnaik A, Choudhury B, Pradhan P, Mishra RK, Christodoulou C. An ANN application for fault finding in antenna arrays. In IEEE Trans Antenna Propagation 2007. 55. Pp. 775-7.
14. Haykins S. Neural networks: A comprehensive foundation. New York: IEEE Press/IEEE Computer Society Press, 1994.
15. Rafael G., Las Heras Fernando, Luis F Herrán. Neural modelling of mutual coupling for antenna array synthesis. In IEEE Trans Antenna Propagation, 2007. 55. Pp. 832-40.
16. Yeo BK, Lu Y. Array failure correction with a genetic algorithm. In IEEE Trans Antenna Propagation 1999.47. Pp. 823-8.
17. Al-Bajari M, Ahmed JM, Ayoob MB. Performance evaluation of an artificial neural network-based adaptive antenna array system. In Lecture Notes Comput Sci 2010, 2. Pp. 11-20.
18. Haykins S. Neural networks: A comprehensive foundation. New York: IEEE Press/IEEE Computer Society Press, 1994.
19. Ibid.
20. Rafael G., Las Heras Fernando, Luis F Herrán. Neural modelling of mutual coupling for antenna array synthesis. In IEEE Trans Antenna Propagation, 2007. 55. Pp. 832-40.

* * *

A Review of Existing and Promising Applications of Artificial Intelligence Technologies in Development and Operation of Active Phased Antenna Array Systems

A. A. Zhilenkov, PhD in Engineering, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
S. G. Chernyi, PhD in Engineering, Associate Professor, Kerch State Maritime Technological University

The methods used in the synthesis of antenna arrays vary from complex analytical methods to iterative numerical ones that are based on optimization algorithms. The disadvantage of these methods is that they usually take into account the array factor, rather than the mutual influence of its elements and problems observed realtime.

This simplification leads to the error in the resulting radiation pattern. Therefore, to improve the accuracy of calculations and models, it is necessary to take into account the physical relationships between parameters of the phased array and the corresponding radiation patterns.

The action of the antenna array is not linear by its nature; this leads to high complexity for modeling and it is usually not taken into account.

Simulation based on artificial neural networks can eliminate the pointed difficulties by approximating the relationships between the desired radiation patterns and the power parameters of the elements of the array, the voltage of the elements and the distance between them in a real antenna array.

Application of neural networks can help transform an antenna array into an intelligent array. This paper considers several neural networks for the synthesis of intelligent antenna arrays and the intelligent synthesis of active phased antenna arrays.

Keywords: phased, array, artificial intelligence, model, antenna, machine learning.

Получено: 6.11.19