

УДК 621.396.96

*Азизов Умид Куванович*  
*старший преподаватель кафедры*  
*Института информационно-коммуникационных технологий*  
*и военной связи Республики Узбекистан*

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ:  
ИСТОРИЧЕСКИЙ ОПЫТ И СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

*Azizov Umid Kuvanovich*  
**Senior Lecturer of the Department**  
**of the Institute of Information and Communication Technologies**  
**and Military Communications of the Republic of Uzbekistan**  
**DEVELOPMENT TRENDS OF RADAR SYSTEMS:**

**HISTORICAL EXPERIENCE END MODERN**  
**DIRECTIONS OF IMPROVEMENT**

*Аннотация. В статье рассматриваются ключевые направления технологической эволюции современных систем радиолокации. Основное внимание уделено переходу к цифровым антенным решеткам, внедрению алгоритмов искусственного интеллекта и концепции когнитивного радара. Анализируются преимущества интеграции радиолокационных каналов с оптико-электронными системами в рамках единых комплексов.*

*Ключевые слова: радиолокация, АФАР, когнитивный радар, искусственный интеллект, комплексирование данных, сверхширокополосные сигналы.*

*Abstract. This article examines key areas of technological evolution in modern radar systems. It focuses on the transition to digital antenna arrays, the implementation of artificial intelligence algorithms, and the concept of cognitive radar. The advantages of integrating radar channels with optoelectronic systems within unified systems are analyzed.*

*Keywords: radar, active phased array antenna (APAA), cognitive radar, artificial intelligence, data fusion, ultra-wideband signals.*

## **Введение**

Радиолокация является одной из ключевых технологий обеспечения безопасности воздушного пространства, управления воздушным движением, противовоздушной обороны, морской навигации, космического мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Современные радиолокационные системы представляют собой сложные информационно-технические комплексы, способные обнаруживать, сопровождать и классифицировать объекты на больших расстояниях независимо от погодных условий и времени суток.

За более чем столетний период своего развития радиолокационные системы прошли путь от простейших экспериментальных установок до многофункциональных цифровых комплексов с элементами искусственного интеллекта. Современный этап развития характеризуется внедрением активных фазированных антенных решёток, когнитивной радиолокации, технологий больших данных и интеграции РЛС в единые информационно-управляющие системы.

## **Предпосылки возникновения радиолокации**

Основой радиолокации стали фундаментальные исследования в области электромагнитных волн.

В 1864 году английский физик Джеймс Клерк Максвелл математически доказал существование электромагнитных волн.

В 1886-1888 годах немецкий физик Генрих Герц экспериментально подтвердил существование волн, предсказанных Максвеллом.

В ходе экспериментов Герц обнаружил важнейшее свойство электромагнитных волн – способность отражаться от металлических объектов. Именно этот эффект впоследствии стал физической основой радиолокации.

Следующим важным этапом стали работы российского учёного Александра Попова, который в 1895 году создал первый радиоприёмник.

### **Первые эксперименты по обнаружению объектов и развитие радиолокации**

В начале XX века исследователи начали рассматривать возможность использования радиоволн для обнаружения объектов.

В 1904 году немецкий инженер Кристиан Хюльсмайер получил патент на устройство «Телемобилоскоп», предназначенное для обнаружения кораблей в условиях плохой видимости. Фактически это устройство стало первым прототипом радиолокатора. Однако уровень развития радиоэлектроники того периода не позволял создать практическую систему измерения дальности и координат целей. [1]

В 1920-1930-е годы ведущие государства начали активные исследования в области радиолокации.

Работы велись одновременно в СССР, Великобритании, Германии, США, Франции.

Основной причиной стала стремительная эволюция авиации. Рост скорости и дальности полёта самолётов требовал создания новых средств раннего предупреждения.

В СССР значительный вклад внесли Ю.Б. Кобзарев, П.А. Ощепков, М.М. Лобанов. В 1934 году советскими учёными была создана первая экспериментальная установка радиобнаружения самолётов.

Период Второй мировой войны стал революционным этапом развития радиолокации. Наиболее развитые радиолокационные системы имели Великобритания, Германия, СССР, США.

Особое значение приобрела британская система раннего предупреждения Chain Home. Она обеспечивала обнаружение немецких самолётов на дальностях до 200 км.

В Германии активно развивались станции Freya, Würzburg.

В США появились первые корабельные и авиационные радиолокаторы.

Основные достижения периода начала XX века: измерение дальности; определение азимута; сопровождение целей; наведение истребителей; управление огнём зенитной артиллерии. Именно в этот период радиолокация окончательно превратилась в самостоятельную отрасль науки и техники.

После окончания войны развитие РЛС ускорилось благодаря достижениям в области электроники, вычислительной техники, полупроводниковых приборов.

Основными направлениями развития являлись: повышение дальности обнаружения, повышение точности и автоматизация процессов. [2]

Дальность обнаружения стала определяться радиолокационным уравнением:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot S_{min}}} \quad (1)$$

где:

$P_t$  – мощность передатчика;

$G$  – коэффициент усиления антенны;

$\lambda$  – длина волны;

$\sigma$  – эффективная площадь рассеяния цели.

Для повышения точности широкое применение получили: импульсные методы; когерентная обработка; селекция движущихся целей.

Автоматизация процессов характеризовалась появлением первых автоматизированных систем управления: ПВО; авиацией; морскими соединениями.

В 1970-1990-е годы произошёл переход от аналоговой обработки сигналов к цифровой. Преимуществами цифровой обработки являлись:

снижение влияния шумов; увеличение точности; автоматическое сопровождение целей; возможность многоканальной обработки. Со временем появились цифровые процессоры сигналов, вычислительные комплексы и автоматические системы распознавания целей. Данный этап считается началом современной эпохи радиолокации. [3]

### **Современные тенденции развития радиолокационных систем**

Наиболее значимой тенденцией последних десятилетий стало внедрение активных фазированных антенных решёток (АФАР). Преимуществами, которых является электронное сканирование луча, отсутствие механического вращения, высокая надёжность, многолучевой режим работы и одновременное сопровождение большого числа целей.

АФАР применяются в таких современных системах, как F-35 Lightning II, Su-57, J-20.

Современная РЛС одновременно выполняет: обнаружение; сопровождение; распознавание; наведение; передачу данных. Таким образом происходит переход к концепции многофункциональных радиолокационных комплексов. [4]

Одним из наиболее перспективных направлений является когнитивная радиолокация, которая основывается на основных принципах: анализ окружающей среды; адаптация параметров сигнала; обучение на основе накопленных данных; оптимизация режимов работы.

Когнитивная РЛС способна самостоятельно изменять мощность, частоту, форму сигнала и алгоритмы обработки. [5]

Традиционные РЛС работают по жестко заданным алгоритмам, что делает их уязвимыми к динамическим помехам. Внедрение адаптивного интеллекта меняет этот подход.

Когнитивный радар непрерывно анализирует окружающую радиоэлектронную обстановку и оценивает эффективность собственной работы (замкнутый цикл восприятия). [6]

Система самостоятельно меняет форму излучаемого сигнала, рабочую частоту, длительность импульсов и мощность в режиме реального времени для обхода помех РЭБ (динамическая адаптация).

Алгоритмы машинного обучения (включая глубокие сверточные нейросети) используются для автоматической классификации целей по их доплеровскому портрету и траекторным признакам (нейросетевое распознавание).

Современные исследования направлены на внедрение технологий искусственного интеллекта. Основными задачи РЛС технологиями искусственного интеллекта будет являться: автоматическое распознавание целей; прогнозирование траекторий; обнаружение малоразмерных объектов; классификация беспилотников. ИИ особенно эффективен при обработке больших потоков радиолокационной информации.

Развитие технологий Stealth привело к необходимости создания новых методов обнаружения. Были предложены такие основные решения, как использование метрового диапазона волн, многопозиционная радиолокация, сверхширокополосные сигналы, квантовые методы обнаружения.

Необходимо отдельно отметить использование сверхширокополосных (СШП) сигналов, которое заключается в переходе в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны частот и открывает новые возможности для селекции малоразмерных объектов. [7] Главные преимущества: *высокое разрешение* – СШП-сигналы обеспечивают сантиметровую точность определения дальности; *распознавание геометрии* – радары получают возможность не просто фиксировать точку в пространстве, но и формировать радиолокационное изображение силуэта цели (технология ISAR).

Сравним развитие радиолокации в ведущих странах мира. Например, в США основными направлениями в радиолокации является использование сетевых РЛС, космической радиолокации и ПРО нового

поколения, а также интеграция с ИИ. Ключевыми разработчиками в США являются: Lockheed Martin; Raytheon Technologies; Northrop Grumman.

В России же приоритеты отдаются на применение РЛС дальнего обнаружения, средств предупреждения о ракетном нападении; противодроновым комплексам и радиолокации метрового диапазона.

В Китае основное внимание уделяется: квантовой радиолокации; космическим РЛС; интеграции с беспилотными системами; искусственному интеллекту.

Турция за последнее десятилетие значительно усилила свои позиции в области радиолокации. Ключевым разработчиком является ASELSAN, а направления, которые в приоритете: национальные РЛС ПВО; морские радиолокационные комплексы; противодроновые системы.

### **Перспективы развития радиолокационных систем до 2040 года**

Ожидается развитие следующих технологий [8]: РЛС будут полностью цифровые; радиолокация станет квантовой; применение роя радиолокационных датчиков; интеграция с космическими системами; появление искусственного интеллекта нового поколения и гиперспектральной радиолокации; использование облачной обработки радиолокационных данных и автономных радиолокационных комплексов. Наиболее перспективной считается концепция интеллектуальной радиолокационной системы, способной самостоятельно адаптироваться к изменяющейся обстановке.

### **Заключение**

История развития радиолокации представляет собой непрерывный процесс совершенствования методов обнаружения и сопровождения объектов. От первых экспериментов Герца и телемобилоскопа Хюльсмайера до современных цифровых комплексов с активными фазированными антенными решётками прошло более ста лет интенсивного научно-технического прогресса. Современный этап характеризуется

внедрением технологий искусственного интеллекта, когнитивной обработки сигналов и сетевых принципов построения радиолокационных систем. В перспективе радиолокация станет одной из ключевых технологий формирования интеллектуального информационного пространства вооружённых сил, гражданской авиации и систем безопасности. По прогнозам специалистов, дальнейшее развитие будет связано с переходом к полностью автономным, самообучающимся и распределённым радиолокационным комплексам, способным эффективно функционировать в условиях высокой динамики современной воздушно-космической обстановки.

#### **Использованные источники:**

1. Кузьмин, И. А. Эволюция радиолокационных систем: от импульсных локаторов к когнитивной радиолокации / И. А. Кузьмин. // Вестник электроники. – 2024. – № 2. – URL: [vestnikelectron.ru](http://vestnikelectron.ru) (дата обращения: 10.05.2026).

2. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация: история, современное состояние, перспективы / В. С. Черняк. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2019. – № 11. – С. 7–29.

3. Габриэльян, Д. Д. Цифровые антенные решетки в перспективных радиолокационных системах / Д. Д. Габриэльян, М. Ю. Звезда. – Москва: Радиотехника, 2021. – 256 с. – ISBN 978-5-93108-212-7.

4. Интеграция радиолокационных и оптико-электронных систем обнаружения и сопровождения объектов: монография / А. А. Кузнецов, В. В. Сидоров, Ю. Н. Николаев [и др.]. – Санкт-Петербург: Научное издание, 2023. – 180 с.

5. Верба, В. С. Когнитивные радиолокационные системы: предпосылки появления, состояние и перспективы развития / В. С. Верба, В. И. Меркулов. // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 3 (5). – С. 5–18.

6. Меркулов, В. И. Оптимизация управления в когнитивных радиоэлектронных системах / В. И. Меркулов. // Информационно-управляющие системы. – 2022. – № 4. – С. 42–51.

7. Искусственный интеллект в радиолокации и радиоэлектронной борьбе / под редакцией А. И. Канащенкова. – Москва: Вузовская книга, 2022. – 312 с.

8. Haykin, S. Cognitive Radar: A Way of the Future / S. Haykin. // IEEE Signal Processing Magazine. – 2006. – Vol. 23, no. 1. – P. 30–40.