

УДК 621.396.96

**СОВРЕМЕННЫЕ ПАССИВНЫЕ РАДИОЛОКАТОРЫ: ПРИНЦИПЫ
ПОСТРОЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
MODERN PASSIVE RADAR SYSTEMS: PRINCIPLES OF
CONSTRUCTION AND DEVELOPMENT PROSPECTS**

А.Т. Будюк, Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, научный руководитель
- Сайбель А.Г., д.т.н., доцент

Аннотация: в статье рассматриваются современные пассивные радиолокационные системы как альтернативный или дополнительный класс радиолокационных комплексов, использующих в качестве зондирующих сигналов сторонние радиоизлучатели. Описаны основные принципы пассивной когерентной радиолокации (PCL), архитектура многопозиционных пассивных систем, проблемы определения координат и разрешения объектов, а также ключевые направления эволюции пассивных радиолокаторов. Показаны преимущества пассивных РЛС по сравнению с активными: высокая электромагнитная скрытность, малая стоимость, низкое энергопотребление и возможность использования существующей инфраструктуры радиовещания и связи.

Ключевые слова: пассивная радиолокация, пассивный радиолокатор, пассивная когерентная радиолокация, PCL, многопозиционная РЛС, радиопеленгация.

Abstract: the article discusses modern passive radar systems as an alternative or additional class of radar systems that use third-party radio emitters as probing signals. It describes the basic principles of passive coherent radar (PCL), the architecture of multi-position passive systems, the challenges of determining the coordinates and resolution of objects, and the key directions for the evolution of passive radars. The article highlights the advantages of passive radars over active radars, including their high electromagnetic stealth, low cost, low power consumption, and the ability to utilize existing radio broadcasting and communication infrastructure.

Keywords: passive radar, passive radar detector, passive coherent radar, PCL, multi-position radar, radio direction finding.

В современных системах радиоэлектронной борьбы и контроля воздушного, наземного и морского пространства возрастает интерес к пассивным методам наблюдения, позволяющим обнаруживать и сопровождать объекты без собственного зондирующего излучения. Пассивные радиолокаторы (ПРЛ) используют в качестве источников сигнала широкий спектр сторонних радиоизлучателей, включая радиовещательные, телевизионные, сотовые, спутниковые навигационные и другие широко распространённые излучатели [1]. Наглядная

иллюстрация принципа действия пассивной радиолокации изображена на рис. 1.

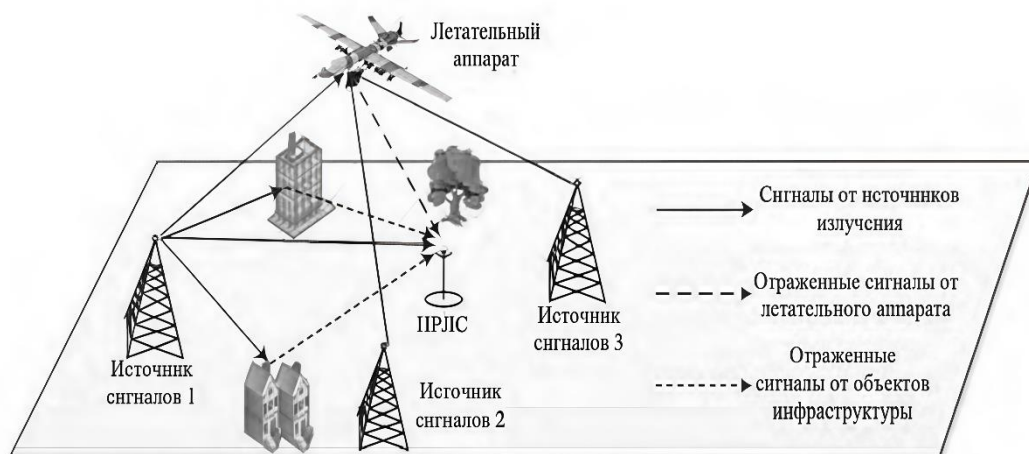


Рис. 1 Принцип действия пассивной радиолокации

Преимущества пассивных РЛС перед активными хорошо известны: отсутствие собственных зондирующих импульсов обеспечивает высокую скрытность работы, а использование уже существующей инфраструктуры радиовещания и связи позволяет существенно снизить стоимость и эксплуатационные затраты комплексов. В то же время пассивные радиолокаторы сталкиваются с рядом специфических проблем, связанных с неполной контролируемостью формы и параметров зондирующих сигналов, а также с высокой степенью помех от прямого и многолучевого сигнала [2].

В данной статье проводится обзор основных принципов построения пассивных радиолокаторов, анализируются современные архитектуры и алгоритмы обработки сигналов, а также формулируются ключевые направления дальнейшего развития данного класса радиолокационных средств.

Пассивная радиолокация базируется на приеме отражённых сигналов от цели, которые порождаются сторонними радиоизлучателями—ретрансляторами (например, ТВ- или FM-станциями, БС сотовой связи, спутниками навигации). Основная идея пассивной когерентной радиолокации (Passive Coherent Location, PCL) заключается в том, что приёмный комплекс имеет доступ как к прямому сигналу от излучателя, так и к его отражению от цели, что позволяет использовать их когерентную обработку и измерение относительного времени задержки и Доплеровского сдвига [3].

Архитектура типичной PCL-системы включает несколько ключевых узлов:

- антенный блок (одна или несколько антенн для опорного и целевого сигналов);

- многоканальный радиоприёмный тракт с широкополосной обработкой;
- блок синхронизации и опорного канала;
- вычислительный комплекс для реализации алгоритмов вторичной обработки и оценивания параметров движения целей [4].

В отличие от активных РЛС, где зондирующий импульс полностью контролируется, в пассивных системах форма и структура сигнала определяются внешним излучателем. В ряде современных решений предлагаются адаптивные методы параметрического оценивания и реконструкции опорного сигнала, что позволяет использовать широкий класс «шумоподобных» сигналов связи и вещания [5].

По количеству приёмных и передающих подсистем пассивные радиолокационные системы можно разделить на одно- и многопозиционные. В простейших односторонних конфигурациях используется один внешний излучатель и один приёмный пункт, что ограничивает разрешение по координатам и точность определения дальности.

Более перспективны распределённые многопозиционные пассивные радиолокаторы, в которых несколько приёмников размещаются на различной территории, а в качестве источников зондирующего сигнала используются несколько радиоизлучателей (TV, FM, GSM, LTE и др.). В этом случае координаты объектов оцениваются по совокупности измерений времени задержки и Доплеровского сдвига, что позволяет реализовать многомерную локализацию и повысить точность позиционирования.

В современных зарубежных и отечественных разработках демонстрируется использование сетей из 3–4 пассивных станций, разнесённых на расстояния порядка 10–40 км, что обеспечивает высокую вероятность обнаружения и устойчивое сопровождение воздушных объектов, в том числе малозаметных и стелс-типа.

Ключевой задачей пассивного радиолокатора является выделение отражённого сигнала от цели на фоне прямого излучения, многолучевых помех и шумов. В силу того, что уровень прямого сигнала может превышать отражённый на несколько порядков, требуется применение сложных цифровых методов подавления и адаптивной фильтрации.

В пассивной когерентной радиолокации (PCL) принимаемый сигнал обычно представляют как сумму опорного сигнала от внешнего излучателя, отражённого сигнала от цели и шума:

$$s(t) = a_0 s_0(t) + a_1 s_0(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} + n(t),$$

где $s_0(t)$ — опорный сигнал (например, FM-радио, DVB-T или LTE-CQI-сигналы); a_0, a_1 — амплитуды прямого и отражённого сигналов; τ — задержка сигнала от цели; f_d — Доплеровский сдвиг, связанный со скоростью цели; $n(t)$ — аддитивный шум.

Для обнаружения объекта чаще всего применяется широкополосная когерентная обработка в корреляционном или двумерном (задержка–Доплер) представлении. В двумерном представлении формируется коррелограмма:

$$C(\tau, f_d) = \int_T s(t) s_0^*(t - \tau) e^{-j2\pi f_d t} dt,$$

где $s_0(t)$ используется как эталонный сигнал, а максимум по (τ, f_d) соответствует параметрам цели.

Положение максимума в коррелограмме позволяет оценить задержку и Доплеровский сдвиг цели. Дальность до цели определяется по измеренной задержке $\hat{\tau}$:

$$\hat{R} = \frac{c\hat{\tau}}{2},$$

где $c \approx 3 \times 10^8$ м/с — скорость света.

Скорость радиальной компоненты v_r оценивается по Доплеровскому сдвигу $\hat{f}_d$:

$$\hat{v}_r = \frac{c\hat{f}_d}{2f_0},$$

где f_0 — несущая частота зондирующего сигнала (например, частота ТВ- или LTE-канала).

Разрешение по дальности ΔR в PCL зависит от эффективной полосы частот зондирующего сигнала B и выражается как:

$$\Delta R = \frac{c}{2B}.$$

Для сопровождения объектов в пассивных радиолокаторах используются многомерные алгоритмы оценивания параметров, включая методы максимального правдоподобия и фильтрацию Калмана. Вектор состояния цели в момент k часто выбирается как

$$\mathbf{x}_k = [R_k, \dot{R}_k, \varphi_k, \dot{\varphi}_k, h_k, \dot{h}_k]^T,$$

где R_k — дальность, φ_k — азимут, h_k — высота (в трёхкоординатных PCL-системах).

Фильтр Калмана позволяет рекуррентно обновлять оценку состояния цели по измерениям $\mathbf{z}_k = [\hat{R}_k, \hat{f}_{d,k}, \hat{\varphi}_k]^T$ с учётом шумов измерений и возмущений модели движения. В ряде современных пассивных комплексов реализуются одноэтапные комбинированные алгоритмы, позволяющие совместно оценивать координаты и параметры движения целей по измерениям нескольких подсистем.

В городских условиях пассивные радиолокаторы могут использовать сигналы сотовой связи и беспроводных сетей Wi-Fi для обнаружения малоподвижных или медленно движущихся объектов, что открывает дополнительные возможности для контроля наземной обстановки и мониторинга транспортных потоков. В этом случае задержка и

Доплеровский сдвиг анализируются в рамках многолучевой модели, а для подавления флуктуаций и помех применяются адаптивные фильтры и методы машинного обучения.

Несмотря на очевидные преимущества, пассивные радиолокаторы имеют ряд ограничений, определяющих их сферу применения. Основными проблемами являются:

- зависимость от внешнего электромагнитного окружения — наличие и распределение излучателей, их стабильность и пропускная способность;
- сложность однозначного определения дальности и высоты объекта при использовании одного или малого числа излучателей;
- необходимость высокой разрядности и быстродействия цифровых устройств для обработки широкополосных сигналов связи и вещания;
- влияние многолучевых помех и фона местности, особенно в городских и прибрежных зонах [6].

Дополнительный сложный аспект связан с синхронизацией распределённых приемных узлов и обеспечением высокой точности измерений времени и фазы, что требует использования GPS/ГЛОНАСС-синхронизации или высокостабильных опорных генераторов.

В перспективе развитие пассивных радиолокаторов идёт по нескольким направлениям:

- интеграция пассивных радиолокационных средств с активными РЛС и радиотехнической разведкой в составе единых комплексов контроля обстановки;
- использование многофункциональных программно-определяемых радиосистем (SDR) для быстрой адаптации к различным типам зондирующих сигналов (FM, DVB-T, LTE, 5G и др.);
- развитие адаптивных алгоритмов цифровой обработки с широким применением методов машинного обучения для классификации и сопровождения объектов;
- расширение спектра применений — от обнаружения воздушных и наземных целей до мониторинга природных объектов и метеонаблюдений.

Особая роль отводится распределённым пассивным радиолокационным комплексам, позволяющим на базе сетей из нескольких станций реализовать высокую стабильность трассы и устойчивое сопровождение объектов даже в условиях сильных помех и при наличии малозаметных целей.

Выводы: пассивные радиолокаторы представляют собой важный и быстро развивающийся класс радиолокационных средств, способных обеспечить высокую электромагнитную скрытность, низкую стоимость и широкие функциональные возможности при контроле воздушного, наземного и, в перспективе, морского пространства. Современные архитектуры PCL-систем и соответствующие алгоритмы обработки

позволяют эффективно использовать сигналы существующей инфраструктуры радиовещания и связи для обнаружения и сопровождения сложных объектов, включая малозаметные и стелс-ТИП.

Важным направлением дальнейших исследований является развитие адаптивных и искусственных-интеллект-ориентированных методов обработки, а также стандартизация моделей и методик оценки эффективности пассивных радиолокаторов в условиях реальных электромагнитных окружений.

Список литературы

1. Пассивная радиолокация : учебное пособие / А. С. Грибанов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 232 с. : ил., табл.

2. Теория и техника радиолокации : учебное пособие / И. Ф. Лозовский – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – 216 с.

3. Подстригаев А.С.. Оценка искажения эффективных секторов постановки когерентной помехи радиолокатору с учетом размещения постановщика помех на авиационном носителе // Радиотехника. 2025. № 9. С. 145–154.

4. Е. Панков. Пассивные радиолокационные станции систем ПВО ведущих зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2023. №5. С. 45-47.

5. В. И. Веремьев, В. Н. Малышев. Пассивные радиолокационные средства контроля обстановки // Интеллектуальный пункт пропуска в России и мире: компетентностный подход к созданию. 2022. // eLIBRARY.RU : научная электронная библиотека. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29759515_22929208.pdf (дата обращения: 10.02.2026).

6. Литвинова Л. М., Полишкар В. С.. Имитация условий работы радиолокатора посадочного аппарата // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2025. Т. 12 № 1. С. 45-49.