



УДК 623.76

МРНТИ 47.41.00

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_7

А.А. Аишев^{1*}, Н.Б. Зикирьяев¹, Е.О. Досжанов², Г.Р. Нысанбаева³

¹ Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи,
г. Алматы, Казахстан

² Farabi University, г. Алматы, Казахстан

³ Академия Гражданской Авиации, г. Алматы, Казахстан

*E-mail: aievaskar@gmail.com

МЕТОДЫ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ

Аннотация. В работе исследуются подходы к определению углового положения объектов посредством установления направления распространения радиоволн, поступающих от источников радиоизлучения или формируемых в результате отражения от объектов. Исследование выполняется в рамках грантового финансирования научно-технического проекта «Разработка аппаратно-программного комплекса для задач пассивной пеленгации источников радиоизлучения ЛА на основе технологии искусственного интеллекта» (договор №332/23-25 от 03.10.2025 г., проект №АР 327016/0225). Проведение исследований также осуществляется в соответствии с решением первого заместителя Министра обороны Вооруженных Сил Республики Казахстан - начальника Генерального штаба Вооруженных Сил Республики Казахстан от 18 ноября 2023 года №62-3-4068. В рамках указанного направления на кафедре основ военной радиотехники и электроники проводится комплексное изучение современных методов пассивного определения направления на источники радиоизлучения. В современной радиопеленгации важной задачей остается точное и оперативное определение угловых координат источников радиоизлучения, включая активные средства постановки помех. Для этого необходимо найти компромисс между точностью измерений, однозначностью привязки и помехоустойчивостью оборудования в сложных условиях многолучевого распространения. В данной работе проводится сравнительный теоретический анализ амплитудных и фазовых методов пеленгования с целью систематизации их технических ограничений и поиска путей их преодоления. С использованием методов математического анализа радиотехнических систем и аналитического обобщения специализированной литературы проведена оценка зависимости чувствительности аппаратуры от геометрии антенных систем. Дополнительно проведено численное моделирование фазового метода пеленгации методом Монте-Карло с варьированием отношения d/λ , отношения сигнал/шум и угла прихода сигнала. Анализ показывает, что классический метод максимума амплитуды обладает низкой чувствительностью к пеленгованию. Фазовые методы, напротив, обеспечивают более высокую точность, однако по мере увеличения расстояния между антеннами они сталкиваются с проблемой неоднозначности пеленга. В результате проведенной работы сделан вывод о том, что для достижения необходимой точности и однозначности измерений наиболее целесообразно использовать комбинированные многоканальные подходы. Кроме того, внедрение современных алгоритмов цифровой обработки сигналов

(например, алгоритма MUSIC) и использование адаптивных антенных решеток могут компенсировать влияние дестабилизирующих факторов многолучевости.

Ключевые слова: амплитудная пеленгация, фазовая пеленгация, зона обнаружения, постановщик активных помех, сигнал, пеленг, помехозащищенность.

Введение.

Для определения направления на источник радиочастотного излучения применяются различные радиотехнические методы. В случае, когда угловое положение объекта устанавливается на основании изменения амплитуды сигнала, поступающего на приемное устройство, данный подход относят к амплитудным методам пеленгации. Изменение уровня принимаемого сигнала при этом обусловлено направленными характеристиками антенных систем. Другую группу составляют фазовые методы, в которых информация о направлении на источник излучения определяется по фазовым соотношениям сигналов, поступающих на пространственно разнесенные антенные элементы. Использование фазовой разности между принимаемыми сигналами позволяет определить угловое положение источника относительно антенной системы. В современной радиопеленгации ключевой задачей является точное и оперативное определение угловых координат (направления) на источники радиоизлучения, включая постановщики активных шумовых помех. Существующие классические методы пеленгации - амплитудный и фазовый - имеют ряд принципиальных технических ограничений, снижающих их эффективность в реальных условиях [1]:

Специфика пеленгации именно постановщиков активных шумовых помех заключается в физической природе их излучения. Такие источники формируют непрерывный шумовой или шумоподобный сигнал высокой мощности, что приводит к работе измерительного тракта пеленгатора в условиях экстремально низкого (зачастую отрицательного) отношения сигнал/шум (SNR). В отличие от пеленгации связных или радиолокационных сигналов, где возможно накопление полезного сигнала, мощная активная помеха маскирует амплитудные и фазовые различия на разнесенных антеннах, что существенно снижает устойчивость системы к флуктуационным ошибкам.

Для амплитудных методов: главным дестабилизирующим фактором является многолучевое распространение радиосигнала (отражения от рельефа, зданий и атмосферы), которое искажает измеряемые амплитуды. Современные исследования подтверждают, что в условиях плотной застройки искажения спектра требуют применения цифровых корреляционно-интерферометрических методов для восстановления аналитического сигнала [2]. Также методы критичны к уровню шумов, геометрии антенн и стабильности приемного тракта. Отдельные модификации (метод максимума) обладают низкой пеленгационной чувствительностью из-за сглаженной формы диаграммы направленности.

Для фазовых методов: основной проблемой выступает необходимость жесткой временной и фазовой синхронизации приемных каналов. Кроме того, возникает внутреннее противоречие: для повышения точности необходимо увеличивать базу между антеннами d/λ , однако это приводит к сужению диапазона однозначного измерения углов и возникновению двужначности пеленга.

Следует подчеркнуть, что хотя выполняемый научно-технический проект в целом направлен на создание комплекса с использованием технологий искусственного интеллекта, настоящая работа посвящена исключительно базовому физико-математическому анализу классических измерительных трактов. Вопросы выбора архитектуры нейросетей, алгоритмов машинного обучения, формирования датасетов и их экспериментальной реализации полностью выходят за рамки данной статьи.

Таким образом, существует научно-техническая проблема поиска компромисса между точностью пеленгации, однозначностью отсчета угловых координат и

помехозащищенностью систем в условиях многолучевого распространения волн и нестабильности параметров оборудования.

В статье отмечается, что базовые теоретические и практические аспекты амплитудных и фазовых методов пеленгации подробно исследованы в классических трудах по радионавигации и радиолокации [3-6].

В современной литературе (в частности, в работах [7-8]) активно рассматриваются вопросы повышения пеленгационной чувствительности и устранения неоднозначности измерений. Исследования развиваются по двум основным направлениям:

Модернизация антенных систем и аппаратной части: рассмотрены методы введения фазовращателей на угол $\frac{\pi}{2}$ для превращения пеленгационной характеристики в нечетную функцию, а также применение многоканальных (многобазовых) и моноимпульсных систем.

Алгоритмические методы (цифровая обработка): в качестве передовых подходов упоминаются современные пространственно-временные алгоритмы оценки направления прихода сигнала (в частности, алгоритм MUSIC - Multiple Signal Classification), методы адаптивной фильтрации и комплексирование данных с нескольких распределенных приемных станций (мультипеленгация и трилатерация). Сравнительный анализ показывает, что алгоритмы подпространства (такие как MUSIC и Beamscan) обеспечивают существенно более высокую разрешающую способность при оценке направления прихода сигнала (DoA) по сравнению с классическими методами [9].

В последние годы для решения проблемы снижения точности пеленга в условиях низкого отношения сигнал/шум (SNR) и многолучевости активно внедряются архитектуры глубокого обучения (Deep Learning) [10]. Современные исследования показывают, что нейросетевые модели способны эффективно извлекать пространственные признаки из ковариационных матриц и напрямую восстанавливать угловые координаты даже при малом числе отсчетов [11]. В частности, использование сверточных сетей и гибридных архитектур позволяет алгоритмически устранять влияние коррелированных источников и шумовых флуктуаций, демонстрируя повышенную робастность по сравнению с классическими методами подпространства в сложной электромагнитной обстановке [12].

Элементы научной новизны данного исследования заключаются в следующем: во-первых, проведено количественное (численное) моделирование уязвимости классического фазового метода пеленгации к условиям экстремально низкого отношения сигнал/шум, характерного именно для прямого воздействия активных шумовых помех; во-вторых, на основе систематизации выявленных ограничений предложена концептуальная архитектура комбинированного аппаратно-программного комплекса, формирующая физико-математический базис для последующего комплексирования классических измерительных трактов с алгоритмами машинного обучения.

Цель работы - провести сравнительный теоретический анализ амплитудных и фазовых методов радиопеленгации, определить математические зависимости их пеленгационной чувствительности и точности от геометрии антенных систем, а также дополнить теоретические положения численным моделированием фазового метода для оценки влияния отношения d/λ , отношения сигнал/шум и угла прихода сигнала на точность и однозначность определения направления.

Материалы и методы исследования.

Амплитудные методы пеленгации. Амплитудные способы определения направления на источник радиоизлучения используют зависимость уровня принимаемого сигнала от углового положения источника относительно антенной системы [6]. В простейшем случае направленные характеристики формируются только приемной антенной. Если ее диаграмма направленности обозначена как $f_{\text{пр}}(\alpha)$, пеленгационная характеристика радиопеленгатора может быть представлена следующим образом:

$$U(\alpha) = kf_{\text{пр}}(\alpha), \quad (1)$$

где k - коэффициент пропорциональности.

В случае, когда направленные свойства присущи одновременно передающей и приемной антеннам, пеленгационная характеристика определяется с учетом диаграмм направленности обеих антенн: $U(\alpha) = kf_{\text{пр}}(\alpha)f_{\text{прд}}(\alpha)$,

где $f_{\text{прд}}(\alpha)$ - диаграмма направленности передающей антенны. Если одна и та же антенна используется как для передачи, так и для приема сигнала, выражение принимает соответствующий вид:

$$f_{\text{прд}}(\alpha) = f_{\text{пр}}(\alpha) = f(\alpha) \text{ значит: } U(\alpha) = kf^2(\alpha). \quad (2)$$

Амплитудная пеленгация. Принцип работы. Амплитудный способ определения направления предполагает использование антенной системы, состоящей из двух или нескольких разнесенных приемных антенн. При поступлении радиосигнала на антенные элементы формируются сигналы, уровни которых зависят от положения источника относительно диаграмм направленности антенн. Для определения направления анализируется разность амплитуд сигналов, принятых отдельными антеннами. При известной пространственной базе между антеннами и определенной разности уровней принимаемых сигналов направление на источник радиоизлучения устанавливается посредством соответствующих геометрических и тригонометрических зависимостей.

Преимущества. К основным преимуществам амплитудной пеленгации относятся сравнительно простая техническая реализация и отсутствие жестких требований к высокоточной синхронизации отдельных приемных каналов. Это позволяет создавать относительно простые многоканальные системы определения направления.

Проблемы и ограничения. Одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих точность амплитудной пеленгации, является многолучевое распространение радиоволн. При взаимодействии радиосигнала с поверхностью земли, зданиями, элементами рельефа и неоднородностями атмосферы в приемную систему могут поступать сигналы, распространяющиеся по различным траекториям. Интерференция прямого и отраженных сигналов изменяет их амплитудные характеристики и, как следствие, приводит к ошибкам при определении направления.

Дополнительным условием надежной работы метода является высокая точность измерения амплитуды принимаемых сигналов. Шумы, внешние электромагнитные помехи и нестабильность параметров приемного тракта способны существенно ухудшать результаты измерений. На точность пеленгации также оказывают влияние рабочая частота, взаимное расположение антенных элементов, их ориентация, поляризация принимаемого сигнала и отношение сигнал/шум. Следует учитывать и геометрические параметры антенной системы. Погрешности определения расстояния между антеннами, а также отклонения их фактической ориентации от расчетного положения непосредственно сказываются на точности вычисления угловой координаты источника.

Применительно к задаче обнаружения активных шумовых помех главным ограничением амплитудного метода становится энергетическая маскировка. Поскольку постановщик помех целенаправленно перекрывает рабочий диапазон частот мощным белым или окрашенным шумом, выделение незначительной разности амплитуд на фоне высокого уровня внешнего шума требует неприемлемо большого времени усреднения. Это лишает систему оперативности и значительно снижает эффективность классического метода максимума в условиях радиопротиводействия.

Фазовая пеленгация. Принцип работы. В отличие от амплитудного способа, фазовый метод основан на анализе фазовых характеристик сигналов, принимаемых несколькими

пространственно разнесенными антеннами. В наиболее распространенной схеме применяются две или более приемные антенны, сигналы которых поступают на фазосравнительное устройство. Основным измеряемым параметром является фазовый сдвиг между сигналами. Фазовый детектор преобразует разность фаз в выходной электрический сигнал, величина которого определяется фазовым соотношением входных колебаний. При известном расстоянии между антеннами и измеренной разности фаз направление прихода электромагнитной волны относительно антенной базы может быть рассчитано.

Преимущества. Одним из важных достоинств фазового метода является его меньшая зависимость от изменений абсолютного уровня принимаемого сигнала. При соответствующей технической реализации фазовая пеленгация позволяет получать более высокую точность определения углового положения источника по сравнению с амплитудными методами.

Проблемы и ограничения. К основным техническим требованиям фазового метода относится обеспечение высокой точности временного и фазового согласования приемных каналов. Даже небольшие фазовые или временные рассогласования могут приводить к погрешностям при измерении фазового сдвига и, следовательно, к ошибкам определения направления на источник. Точность метода также зависит от условий распространения радиоволн. Многолучевость, параметры и взаимная геометрия антенной системы, стабильность фазосравнительной аппаратуры, рабочая частота и ограниченный диапазон однозначного определения фазовой разности являются факторами, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации фазовых радиопеленгаторов.

В контексте пеленгации активных помех ключевой проблемой фазового метода становится разрушение фазового фронта волны. Мощное шумовое излучение постановщика вызывает интенсивные случайные фазовые флуктуации в пространственно разнесенных приемных каналах. Как показано далее в результатах численного моделирования, падение отношения сигнал/шум до отрицательных значений (что является штатным режимом при подавлении) приводит к резкому росту дисперсии фазовой ошибки, из-за чего фазовый детектор начинает выдавать ложные значения, заметно снижая достоверность пеленга.

Базовый принцип фазового пеленгования обычно заключается в оценке фазового сдвига сигналов, поступающих на пространственно разнесенные приемные элементы [8]. В качестве базовой геометрической модели измерительной системы можно представить две точки приема (условно A и B), физическая дистанция между которыми образует антенную базу длиной d . Как правило, при расчетах полагается, что источник радиоизлучения находится в дальней зоне. При выполнении этого условия падающий электромагнитный фронт можно с достаточной степенью точности рассматривать как плоский.

Из-за того, что электромагнитное излучение проходит неодинаковый путь от целевого источника до каждой из антенн, возникает геометрическая разность хода. Следствием этого эффекта становится регистрируемый фазовый сдвиг φ_p , который вычисляется через разницу дистанций от излучателя до приемных узлов:

$$\varphi_p = \frac{2\pi}{\lambda}(R_A - R_B). \quad (3)$$

где R_A и R_B - расстояния от источника до первой и второй приемных антенн соответственно. Если расстояние до источника значительно превышает величину антенной базы ($R_A \gg d$ и $R_B \gg d$), направления распространения волны к обоим антеннам можно считать практически параллельными. В рамках такой аппроксимации геометрическая связь

между разностью хода волн и углом прихода сигнала обычно выражается как: $R_A \gg d$ и $R_B \gg d$ $\varphi_p = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha$,

где α - угол между нормалью к антенной базе и направлением на источник радиоизлучения.

Измеряя фазовый сдвиг, можно попытаться оценить угол прихода волны с помощью обратной зависимости:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\varphi_p}{2\pi d/\lambda}\right). \quad (4)$$

Здесь видится целесообразным более подробно остановиться на математических и аппаратных ограничениях функции арксинуса в контексте радиопеленгации. Как правило, для получения однозначной и физически достоверной оценки угла прихода сигнала значение измеряемой фазовой разности φ_p должно строго находиться в пределах главного интервала $[-\pi, \pi]$. Если истинная геометрическая разность фаз начинает превышать этот диапазон (что зачастую наблюдается при использовании измерительных баз $d > \lambda/2$ и отклонении источника от нормали), происходит фазовый переход через границы $\pm\pi$. В момент такого перехода измерительный тракт обычно приводит (или «заворачивает») фазу обратно в базовый интервал. Применение формулы (4) к такому приведенному значению, как и ожидается, дает математически допустимый, но физически ложный угол. Именно этот механизм скачкообразного перехода через $\pm\pi$ можно рассматривать как основную причину возникновения фазовой неоднозначности, которая существенно ограничивает сектор обзора при работе с широкобазовыми антенными системами.

Для определения двух угловых координат источника в трехмерном пространстве может применяться дополнительная пара приемных антенн. Совместная обработка результатов измерений в большинстве случаев позволяет определить пространственное направление на источник. В качестве основного фазочувствительного устройства часто используется фазовый детектор. Его выходное напряжение зависит от разности фаз входных сигналов и в общем случае может быть описано косинусоидальной зависимостью:

$$S = k \cos \varphi_p. \quad (5)$$

С учетом зависимости фазы от угла, пеленгационная характеристика фазового радиопеленгатора может быть представлена в следующем виде:

$$U(\alpha) = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right). \quad (6)$$

Для малых углов, когда справедливо приближение $\sin(\alpha) \approx \alpha$, видится возможным использовать линейное представление. В этом случае выражение принимает упрощенный вид:

$$U(\alpha) = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \alpha\right). \quad (7)$$

Подобное приближение обычно считается допустимым при нахождении объекта вблизи нормали к антенной базе, однако при больших отклонениях угла погрешность такой аппроксимации может существенно возрастать.

Численная модель и параметры моделирования. Для количественной иллюстрации теоретических зависимостей, рассмотренных выше, было выполнено численное моделирование двухантенной фазовой пеленгационной системы. Моделирование проводилось в программной среде *Python* методом Монте-Карло. В качестве основных

варьируемых параметров рассматривались отношение пространственной базы к длине волны d/λ (выбраны значения 0.25, 0.5, 1.0, 2.0), отношение сигнал/шум (SNR) в диапазоне от -10 до 20 дБ и истинный угол прихода сигнала θ в пределах $\pm 60^\circ$. Для каждой комбинации параметров выполнялось $N = 10000$ независимых реализаций.

В модели фазовая разность между сигналами двух приемных элементов определялась выражением:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin\theta \quad (8)$$

Для учета случайной составляющей измерительной погрешности к рассчитанной фазовой разности добавлялась гауссовская фазовая ошибка. Среднеквадратическое отклонение фазовой ошибки определялось в зависимости от линейного отношения сигнал/шум в соответствии с принятой моделью:

$$\sigma\Delta\varphi = \sqrt{\frac{1}{2SNR_{lin}}} \quad (9)$$

где $SNR_{lin} = 10^{(SNR_{дБ} / 10)}$. После учета шумовой составляющей измеренная фазовая разность приводилась к основному интервалу $[-\pi, \pi]$, после чего направление прихода восстанавливалось по обратной зависимости:

$$\hat{\theta} = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi_{wrap}}{2\pi(d/\lambda)}\right) \quad (10)$$

В качестве итоговой метрики точности использовалась среднеквадратическая ошибка (RMSE) оценки угла:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta)^2} \quad (11)$$

где $\hat{\theta}$ — оценка угла в i -й реализации, а θ — заданный истинный угол прихода сигнала. Такое представление позволяет непосредственно воспроизвести основное ограничение классического фазового метода: увеличение d/λ повышает чувствительность к изменению угла, но одновременно приводит к фазовой неоднозначности при превышении измеряемой фазовой разностью интервала $[-\pi, \pi]$.

Результаты и их обсуждение.

В зависимости от способа формирования пеленгационной характеристики *амплитудные методы* определения направления подразделяются на методы максимума, минимума и сравнения [6]. При использовании метода максимума направление на источник радиоизлучения определяется в процессе плавного изменения положения диаграммы направленности приемной антенны. Пеленг соответствует такому положению диаграммы, при котором ее максимум α_0 совпадает с направлением на объект α . В этот момент уровень напряжения на выходе приемного устройства достигает наибольшего значения.

Метод максимума эффективен благодаря простой технической реализации и достижению максимального отношения сигнал/шум точно в момент пеленгации [3].

В то же время существенным ограничением данного подхода является относительно невысокая пеленгационная чувствительность, вследствие чего точность определения углового положения источника оказывается ограниченной.

Пеленгационная чувствительность характеризует изменение выходного сигнала радиопеленгатора при небольшом изменении углового положения диаграммы направленности относительно направления на источник. Количественно данный параметр определяется величиной крутизны пеленгационной характеристики:

$$K_{\Pi} = \left| \frac{dU(\alpha)}{d\alpha} \right| \alpha = \alpha_0. \quad (12)$$

Оценить абсолютную погрешность определения угловой координаты можно по следующей формуле, где U — порог чувствительности (минимальный регистрируемый сдвиг) выходного напряжения измерительного тракта:

$$\Delta\alpha \approx \frac{\Delta U}{K_{\Pi}} \quad (13)$$

Следовательно, увеличение крутизны пеленгационной характеристики приводит к повышению чувствительности радиопеленгатора и уменьшению погрешности определения угла [7].

Практическое применение метода максимума ограничивается тем, что вершина диаграммы направленности антенны, как правило, имеет достаточно плавную форму. Поэтому в непосредственной близости от максимума крутизна пеленгационной характеристики невелика, что и обуславливает сравнительно невысокую точность данного метода.

В методе минимума используется диаграмма направленности с ярко выраженным провалом. В процессе изменения ее углового положения определяется момент, когда минимум пеленгационной характеристики совпадает с направлением на источник радиоизлучения [6]. В рассматриваемом положении выходное напряжение приемника принимает минимальное значение. Поскольку в области минимума пеленгационная характеристика обладает большей крутизной, чем вблизи максимума, потенциальная точность определения направления оказывается выше. Однако применение метода связано с определенными ограничениями. Вблизи направления на объект уровень принимаемого сигнала значительно уменьшается, вследствие чего ухудшаются условия его надежного обнаружения и оценки дальности. По этой причине метод минимума преимущественно используется в радионавигационных системах при определении направления на источники, характеризующиеся достаточно высоким уровнем собственного излучения [4].

В методе сравнения угловое положение источника определяется посредством сопоставления амплитуд сигналов, формируемых двумя каналами и соответствующих двум пересекающимся диаграммам направленности $f_1(\alpha)$ и $f_2(\alpha)$. Выходные напряжения соответствующих приемных каналов определяются выражениями:

$$S_1 = k_1 f_1(\alpha_0), \quad S_2 = k_2 f_2(\alpha_0). \quad (14)$$

Для исключения влияния общего уровня принимаемого сигнала целесообразно использовать отношение выходных сигналов. В результате получаем:

$$S = \frac{S_1}{S_2} = \frac{k_1 f_1(\alpha_0)}{k_2 f_2(\alpha_0)}. \quad (15)$$

Экспериментальное определение отношения сигналов S и решение уравнения (15) относительно α_0 позволяют найти искомое направление на источник радиоизлучения.

Существенным преимуществом метода сравнения является возможность оперативного определения направления в относительно широком угловом секторе без необходимости механического перемещения антенной системы [6]. Вместе с тем точность получаемого результата определяется формой используемых диаграмм направленности, их взаимной ориентацией и углом прихода электромагнитной волны.

Частным случаем метода сравнения является *равносигнальный способ пеленгации*, при котором условием определения направления служит равенство амплитуд сигналов двух приемных каналов:

$$S = \frac{S_1}{S_2} = 1. \quad (16)$$

Основным преимуществом равносигнального метода является возможность достижения сравнительно высокой точности определения угловой координаты. Это обусловлено тем, что измерение производится на участке пеленгационной характеристики с достаточно высокой крутизной. Равносигнальный принцип получил широкое применение в автоматических системах сопровождения объектов по угловым координатам. В таких системах в качестве информативного параметра может использоваться не отношение, а разность выходных сигналов двух каналов:

$$S = S_1 - S_2. \quad (17)$$

Полученное рассогласование используется системой управления для корректировки положения антенной системы либо ее диаграммы направленности. Направление корректирующего воздействия определяется знаком величины S . Система стремится уменьшить рассогласование до нулевого значения, вследствие чего равносигнальное направление непрерывно изменяется вслед за перемещением объекта.

Методы сравнения находят применение как в многоканальных радиопеленгаторах, включая моноимпульсные системы, так и в одноканальных устройствах. В многоканальной реализации сигналы сравниваются одновременно, что способствует повышению точности измерений и помехоустойчивости системы. В одноканальном варианте диаграмма направленности периодически изменяется, а сопоставление сигналов осуществляется между отсчетами, полученными в различные моменты времени. Такая структура отличается большей простотой, однако характеризуется более низкой помехоустойчивостью [4].

При использовании симметричной пеленгационной характеристики в окрестности ее $\alpha = 0$ крутизна может быть недостаточной для обеспечения высокой точности определения направления. Кроме того, вследствие четности такой характеристики одному и тому же значению выходного сигнала могут соответствовать два симметричных направления. Это приводит к неоднозначности определения угловой координаты.

Для устранения указанной неоднозначности и повышения чувствительности в один из приемных каналов вводится фазовый сдвиг величиной $\pi/2$. В результате симметрия пеленгационной характеристики нарушается, и она приобретает вид нечетной функции:

$$U(\alpha) = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}d\alpha\right) \approx \frac{2\pi}{\lambda}d\alpha. \quad (18)$$

Для нахождения крутизны пеленгационной характеристики используется выражение:

$$K_p = \frac{dU(\alpha)}{d\alpha} \Big|_{\alpha=0} = 2\pi \frac{d}{\lambda} \quad (19)$$

Рост отношения d/λ ведет к увеличению пеленгационной чувствительности, что повышает точность определения угловой координаты. Однако увеличение пространственной базы относительно длины волны одновременно приводит к сокращению интервала однозначного определения угла. Для обеспечения однозначного измерения

фазовой разности необходимо выполнение соответствующего условия: $|\varphi_p| < \pi$. Для малых углов данное соотношение принимает упрощенный вид:

$$\varphi_p \approx \frac{2\pi d\alpha}{\lambda}, \quad (20)$$

Вследствие этого диапазон однозначного определения угловой координаты определяется соответствующей зависимостью: $\Delta\alpha_{\max} = \frac{\lambda}{2d}$.

На первом этапе было исследовано влияние отношения d/λ на фазовую характеристику системы (Рис. 1а). При $d/\lambda = 0.25$ зависимость фазовой разности от угла остается однозначной во всем рассматриваемом диапазоне. При $d/\lambda = 0.5$ фазовая разность достигает границы основного интервала $\pm\pi$ при $|\theta| = 90^\circ$, поэтому в рассматриваемом диапазоне углов неоднозначность не возникает, однако дальнейшее увеличение базы приводит к сокращению сектора однозначного измерения. При $d/\lambda = 1.0$ и 2.0 наблюдаются повторяющиеся фазовые переходы, обусловленные приведением фазовой разности к интервалу $[-\pi, \pi]$. Для $d/\lambda = 2.0$ граница основного однозначного сектора составляет:

$$|\theta| \leq \arcsin\left(\frac{1}{\frac{2d}{\lambda}}\right) \approx 14.5^\circ \quad (21)$$

Таким образом, результаты моделирования подтверждают теоретический вывод о существовании компромисса между пеленгационной чувствительностью и диапазоном однозначного измерения.

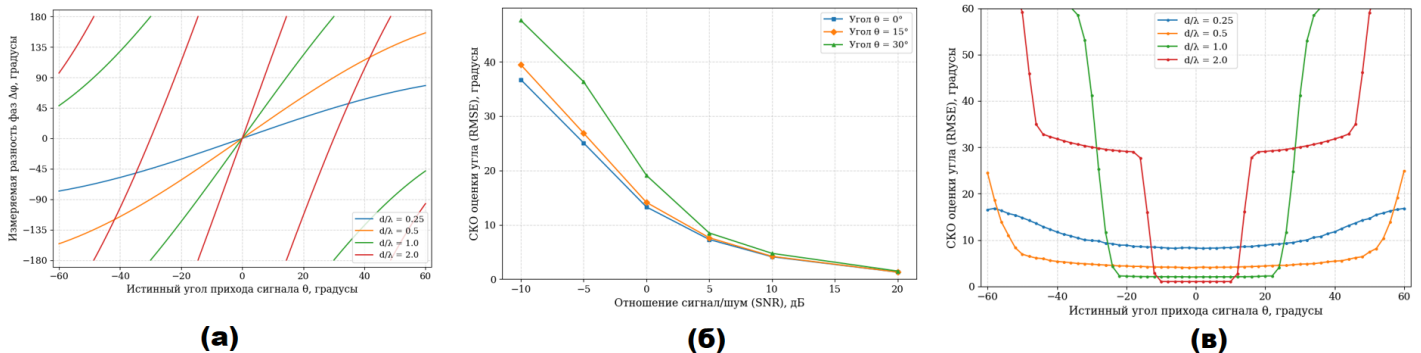


Рисунок 1 – Зависимость измеряемой разности фаз от истинного угла прихода сигнала для различных значений d/λ (а); зависимость среднеквадратической ошибки (RMSE) оценки угла от отношения сигнал/шум при фиксированной базе $d/\lambda = 0.5$ (б); зависимость среднеквадратической ошибки (RMSE) пеленгования от истинного угла прихода при фиксированном $SNR = 10$ дБ (в).

На втором этапе исследовалось влияние отношения сигнал/шум на среднеквадратическую ошибку определения угла ($RMSE$) при фиксированном $d/\lambda = 0.5$ для различных истинных углов прихода сигнала (Рис. 1б). С уменьшением SNR наблюдается закономерное увеличение ошибки пеленгования. Наиболее высокая точность достигается при высоких значениях SNR ; например, при $SNR = 20$ дБ $RMSE$ для $\theta = 0^\circ$ составляет около 1.3° . При $SNR = -10$ дБ ошибка возрастает до нескольких десятков градусов, что количественно подтверждает уязвимость классического фазового метода при прямом воздействии активных шумовых помех, когда система вынуждена работать в условиях экстремально низкого отношения сигнал/шум.

На третьем этапе был исследован совместный эффект угла прихода и отношения d/λ при фиксированном $SNR = 10$ дБ (Рис. 1в). Вблизи нормального направления ($\theta = 0^\circ$) увеличение пространственной базы приводит к существенному снижению $RMSE$. В

частности, для $d/\lambda = 0.25$ ошибка составляет около 8.2° , тогда как при $d/\lambda = 2.0$ она уменьшается приблизительно до 1° . Однако с увеличением угла прихода для широкобазовой системы происходит резкое ухудшение точности. Для $d/\lambda = 2.0$ уже при приближении к границе однозначного сектора около $\pm 14.5^\circ$ возникает фазовая неоднозначность, вследствие которой восстановленный угол может соответствовать ложной ветви пеленгационной характеристики. Это приводит к резкому скачкообразному увеличению $RMSE$ за пределами однозначного сектора.

Полученные результаты численного моделирования подтверждают теоретические положения, представленные в работе: увеличение отношения d/λ позволяет повысить угловую чувствительность и потенциальную точность фазового пеленгования, однако одновременно уменьшает диапазон однозначного определения направления.

Обобщенные результаты сравнительного теоретического анализа, объединяющие классические основы радионавигации и современные алгоритмические подходы, представлены в Таблице 1. Как видно из приведенных данных, ни один из методов в своем изолированном виде не способен одновременно обеспечить высокую пеленгационную чувствительность, устойчивость к дестабилизирующим факторам и однозначность измерений

Таблица 1 - Сравнительный анализ характеристик методов пеленгации источников радиоизлучения

Метод пеленгации	Пеленгационная чувствительность и точность	Диапазон однозначного измерения	Устойчивость к многолучевости и помехам	Аппаратная и вычислительная сложность	Ключевые особенности и применение
Амплитудный (метод максимума)	Низкая. Крутизна характеристики вблизи сглаженного максимума мала, что ведет к росту погрешности измерения.	Широкий (определяется шириной основного лепестка диаграммы направленности антенны).	Низкая. Сигналы сильно искажаются отражениями от рельефа и застройки, требуя корреляционно-интерферометрического восстановления.	Низкая. Не требует высокоточной фазовой синхронизации каналов.	Дает наибольшее отношение сигнал/шум в момент отсчета. Подходит для систем с невысокими требованиями к точности.
Амплитудный (метод минимума)	Высокая. Обеспечивается за счет измерения на участке с выраженным провалом и высокой крутизной.	Широкий.	Низкая. В условиях шумов "провал" замыывается, что снижает достоверность.	Ниже средней.	Позволяет точно определить угол, но из-за малой амплитуды сигнала затрудняет определение дальности. Применяется для мощных источников.
Амплитудный (сравнения / равносигнальный)	От высокой до очень высокой. Измерение выполняется на скачках диаграмм с максимальной крутизной.	Средний. Ограничен сектором пересечения двух диаграмм направленности.	Средняя. Многоканальное сравнение позволяет частично компенсировать влияние помех.	Средняя. В многоканальных системах необходима строгая идентичность характеристик приемных трактов.	Обеспечивает быстрое определение направления (без механического вращения). Широко применяется в системах автоматического сопровождения целей.

Фазовый (классический интерферометр)	Очень высокая. Возрастает прямо пропорционально увеличению отношения базы к длине волны (d/λ).	Узкий. Обратно пропорционален размеру антенной базы; при больших базах возникает двусмысленность (многозначность) пеленга.	Низкая. Фазовая интерференция переотраженных лучей вызывает критические сбои.	Высокая. Требуется наличие фазовых детекторов и жесткой временной и фазовой синхронизации каналов.	Потенциально наиболее точный метод из классических, но требует конструктивных решений для устранения неоднозначности (например, комбинации малых и больших баз).
Комбинированный (многобазовый фазовый + ЦОС)	Высокая (сверхразрешение). Как правило, использование алгоритмов подпространства (MUSIC, Beamscan) позволяет существенно повысить разрешающую способность по сравнению с классическими методами [9].	Широкий. Интеграция методов интерферометрии с алгоритмами подпространства и использование разноразмерных баз алгоритмически устраняют неоднозначность.	Высокая. Пространственно-временная обработка и адаптивные решетки позволяют выделять прямой сигнал и подавлять активные помехи [3].	Очень высокая. Требуется когерентного приема, высокоскоростных АЦП и значительных вычислительных ресурсов.	Считается одним из наиболее эффективных решений для современных систем пеленгации в условиях сложной электромагнитной обстановки и многолучевости [8].

Многоканальный способ пеленгации [8] позволяет повысить точность измерений и устранить их неоднозначность. Так, в двухканальной схеме за счет третьей антенны формируются две базы — малая и большая. Малая база используется для предварительной оценки направления и обеспечивает однозначность определения угла, тогда как увеличение длины базы позволяет получить более высокую разрешающую способность и выполнить уточненный отсчет угловой координаты. При этом современные комбинированные методы, интегрирующие корреляционные интерферометры на основе L1-нормы с алгоритмом MUSIC, позволяют эффективно разрешать фазовую неоднозначность даже при малом отношении сигнал/шум [13].

Кроме того, важным аспектом является оценка параметров когерентных и некогерентных источников в распределенных приемных системах (мультипеленгация), что требует применения модифицированных алгоритмов пространственного сглаживания [14]. В свою очередь, использование адаптивных антенных систем в таких комплексах позволяет формировать узкие диаграммы направленности, усиливать сигналы требуемого направления и пространственно подавлять излучения, поступающие с нежелательных направлений [15].

Для наглядного представления описанного комплексного подхода на рисунке 2 приведена обобщенная структурная схема разрабатываемой пеленгационной системы, все элементы которой представляют собой предлагаемую концептуальную архитектуру.

Место рассматриваемых классических методов и алгоритмов цифровой обработки в дальнейшей AI-архитектуре комплекса заключается в первичной подготовке признаковового пространства. Вычисленные фазовые сдвиги и пространственные спектры (полученные, например, методом MUSIC) планируется использовать в качестве структурированных входных данных (обучающих выборок) для нейросетевых моделей, что обеспечит их робастность при классификации помех.

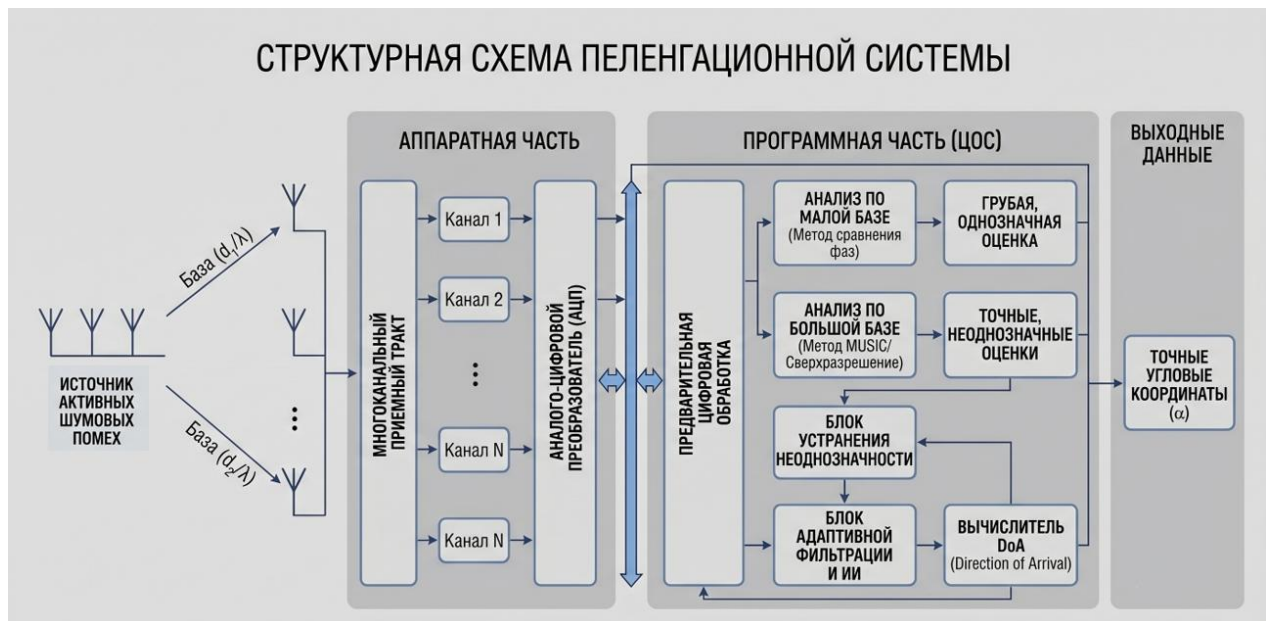


Рисунок 2 – Структурная схема пеленгационной системы

Устранить неоднозначность при определении направления на источник радиоизлучения можно с помощью антенн с узкими диаграммами направленности. При этом ширина α_a диаграммы должна соответствовать установленному условию: $\alpha_a < \Delta\alpha_{\max}$. Использование остронаправленных антенных систем не только позволяет обеспечить однозначность пеленгации, но и повышает угловое разрешение, благодаря чему становится возможным различение нескольких объектов, расположенных близко друг к другу по угловой координате.

Заключение.

В результате проведенного теоретического анализа амплитудных и фазовых методов пеленгации установлено, что применение классических подходов в изолированном виде зачастую оказывается недостаточным для обеспечения требуемой точности, однозначности и помехозащищенности в условиях сложной электромагнитной обстановки, многолучевого распространения и активного радиопротиводействия.

Проведенное численное моделирование методом Монте-Карло количественно подтвердило уязвимость классического фазового метода: показано, что при падении отношения сигнал/шум до отрицательных значений (что типично при воздействии активных шумовых помех) наблюдается резкий рост дисперсии фазовой ошибки и возрастает риск возникновения фазовой неоднозначности.

На основе систематизации технических ограничений сделан вывод, что одним из наиболее перспективных решений для современных систем является переход к комбинированным многоканальным архитектурам. Для существенного повышения точности пеленгации и минимизации влияния дестабилизирующих факторов выделены следующие целесообразные подходы:

- Внедрение алгоритмов пространственно-временной цифровой обработки (в частности, методов подпространства типа MUSIC) для программного нивелирования фазовой неоднозначности и пространственной фильтрации шумов.
- Интеграция данных от нескольких распределенных приемных станций (трилатерация и мультипеленгация), что играет определяющую роль в повышении достоверности пространственной локализации источника.

- Использование адаптивных антенных решеток, обеспечивающих динамическое управление диаграммой направленности для пространственного выделения полезного сигнала.

- Систематический учет аналитических моделей распространения радиоволн и регулярная аппаратная калибровка измерительных трактов для компенсации систематических погрешностей.

Таким образом, синтез многобазовых амплитудно-фазовых измерений с алгоритмами цифровой обработки сигналов формирует надежный базис для создания современных пеленгационных комплексов. Рассмотренные в работе математические модели и пространственные спектры выступают важным этапом предварительной обработки радиосигналов. В рамках развития предлагаемой концептуальной архитектуры комплекса эти извлеченные признаки послужат основой (структурированной обучающей выборкой) для внедрения алгоритмов искусственного интеллекта. Предлагаемый подход позволит существенно повысить эффективность обнаружения и точного определения угловых координат постановщиков активных шумовых помех даже в условиях интенсивного дестабилизирующего воздействия.

Список литературы

1. Алексеев, М.В. & Молоканов, А.А. (2019). Фазовый метод радиопеленгации. Форум молодых ученых, (12(40)), 23-26. <https://cyberleninka.ru/article/n/fazovyy-metod-radiopelengatsi>
2. Sabibolda, A., Tsyporenko, V., Tsyporenko, V., Smailov, N., Zhunussov, K., Abdykadyrov, A., Baigulbayeva, M. & Duisenov, N. (2022). Improving the accuracy and performance speed of the digital spectral-correlation method for measuring delay in radio signals and direction finding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(9(115)), 6–14. DOI: [10.15587/1729-4061.2022.252561](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252561)
3. Singh, R. K., Higgins-Chen, M., Zhou, H., Falkner, B., & Mehta, A. (2023). MUSIC and Pattern Synthesis Based Anti-Jamming Software Application for Research & Education. In 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI) (pp. 1319-1320). IEEE. DOI: [10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238045](https://doi.org/10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238045)
4. Xu, J., Chen, B., Zhang, Z., Li, X., Hou, Y., & Li, Z. (2024, September). 2-D DOA Estimation Under Mainlobe Jamming Based on Subarray Level Blind Source Separation. In 2024 7th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP) (pp. 613-618). IEEE. DOI: [10.1109/ICICSP62589.2024.10809034](https://doi.org/10.1109/ICICSP62589.2024.10809034)
5. Shen, L., Li, J., Pan, J., Shi, J., Xu, R., Wang, H., & Deng, W. (2025). Domain-adaptive direction of arrival (DOA) estimation in complex indoor environments based on convolutional autoencoder and transfer learning. Sensors, 25(10), 2959. DOI: [10.3390/s25102959](https://doi.org/10.3390/s25102959)
6. Ahmad B.I., Harman S., Godsill S.A. (2024). Bayesian track management scheme for improved multi-target tracking and classification in drone surveillance radar // IET Radar, Sonar & Navigation, 18(1), 137-146. DOI: [10.1049/rsn2.12458](https://doi.org/10.1049/rsn2.12458)
7. Zhao, H., Gong, J., & Zhou, C. (2026). A Deep Learning Approach for Direction-of-Arrival Estimation in Low-SNR Environments. Applied Sciences, 16(12), 5747. DOI: [10.3390/app16125747](https://doi.org/10.3390/app16125747)
8. Namie, H., Nagafuchi, D., & Fujita, T. (2025). Satellite signal arrival direction estimation to reduce multipath errors using general-purpose receivers and the Multiple Signal Classification (MUSIC) method in satellite positioning. IEICE Communications Express, 14(6), 257-259. DOI: [10.23919/comex.2025XBL0034](https://doi.org/10.23919/comex.2025XBL0034)
9. Cahl, D., Voulgaris, G. & Leonard, L. (2023). A comparison of beamforming and direction finding algorithms (beamscan and MUSIC) on a linear array HF radar in a medium to

low wave energy environment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 40(2), 191-218. DOI: [10.1175/JTECH-D-22-0005.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-22-0005.1)

10. Zhou, L., Zhou, S., Qi, Y., Wu, L., & Benezeth, Y. (2025). A deep shrinkage network for direction-of-arrival estimation with sparse prior. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(2), 206. <https://doi.org/10.3390/jmse13020206>

11. Tian, Q., Cai, R., & Luo, Y. (2024). DOA estimation based on an adversarial learning network via small antenna arrays. *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 47(4), 226-232. DOI: 10.1109/ICJECE.2024.3472657

12. He, W., Shi, Y., Wang, J., & Zhao, H. (2026). A Low-SNR DOA Estimation Model Based on Sequential and Convolutional Feature Fusion. *Sensors*, 26(10), 3093. <https://doi.org/10.3390/s26103093>

13. Локтионов, Е.Ю., Протасов, Ю.С., Протасов, Ю.Ю., Телех, В.Д. & Хазиев, Р.Р. (2013). Разработка методики комбинированной интерферометрии светозероизонных потоков и комплексной автоматизированной обработки ее результатов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, (10(22)), 38. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-10-1037](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-10-1037)

14. Aounallah, N., Bekhta, M. & Kina, A. (2024). Direction of arrival estimation methods for coherent and non-coherent sources. *Journal of Smart Antenna Systems*, 12(4), 112-128.

15. Дмитриев, Д.Д. & Карцан, И.Н. (2016). Адаптивные антенные решетки с цифровым формированием луча. *Решетневские чтения*, 1(20), 263-265. <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnye-antennye-reshetki-s-tsifrovym-formirovaniem-lucha>

References

1. Alekseev, M.V. & Molokanov, A.A. (2019). Fazovyi metod radiopelengatsii. *Forum molodykh uchenykh*, (12(40)), 23-26. <https://cyberleninka.ru/article/n/fazovyy-metod-radiopelengatsi>

2. Sabibolda, A., Tsyporenko, V., Tsyporenko, V., Smailov, N., Zhunussov, K., Abdykadyrov, A., Baigulbayeva, M. & Duisenov, N. (2022). Improving the accuracy and performance speed of the digital spectral-correlation method for measuring delay in radio signals and direction finding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(9(115)), 6-14. DOI: [10.15587/1729-4061.2022.252561](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252561)

3. Singh, R. K., Higgins-Chen, M., Zhou, H., Falkner, B., & Mehta, A. (2023). MUSIC and Pattern Synthesis Based Anti-Jamming Software Application for Research & Education. In 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI) (pp.1319-1320). IEEE. DOI: [10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238045](https://doi.org/10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238045)

4. Xu, J., Chen, B., Zhang, Z., Li, X., Hou, Y., & Li, Z. (2024, September). 2-D DOA Estimation Under Mainlobe Jamming Based on Subarray Level Blind Source Separation. In 2024 7th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP) (pp. 613-618). IEEE. DOI: [10.1109/ICICSP62589.2024.10809034](https://doi.org/10.1109/ICICSP62589.2024.10809034)

5. Shen, L., Li, J., Pan, J., Shi, J., Xu, R., Wang, H., & Deng, W. (2025). Domain-adaptive direction of arrival (DOA) estimation in complex indoor environments based on convolutional autoencoder and transfer learning. *Sensors*, 25(10), 2959. DOI: [10.3390/s25102959](https://doi.org/10.3390/s25102959)

6. Ahmad B.I., Harman S., Godsill S.A. (2024). Bayesian track management scheme for improved multi-target tracking and classification in drone surveillance radar // *IET Radar, Sonar & Navigation*. 18(1), 137-146. DOI: [10.1049/rsn2.12458](https://doi.org/10.1049/rsn2.12458)

7. Zhao, H., Gong, J., & Zhou, C. (2026). A Deep Learning Approach for Direction-of-Arrival Estimation in Low-SNR Environments. *Applied Sciences*, 16(12), 5747. DOI: [10.3390/app16125747](https://doi.org/10.3390/app16125747)

8. Namie, H., Nagafuchi, D., & Fujita, T. (2025). Satellite signal arrival direction estimation to reduce multipath errors using general-purpose receivers and the Multiple Signal

Classification (MUSIC) method in satellite positioning. IEICE Communications Express, 14(6), 257-259. DOI: [10.23919/comex.2025XBL0034](https://doi.org/10.23919/comex.2025XBL0034)

9. Cahl, D., Voulgaris, G. & Leonard, L. (2023). A comparison of beamforming and direction finding algorithms (beamscan and MUSIC) on a linear array HF radar in a medium to low wave energy environment. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 40(2), 191-218. DOI: [10.1175/JTECH-D-22-0005.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-22-0005.1)

10. Zhou, L., Zhou, S., Qi, Y., Wu, L., & Benezeth, Y. (2025). A deep shrinkage network for direction-of-arrival estimation with sparse prior. Journal of Marine Science and Engineering, 13(2), 206. <https://doi.org/10.3390/jmse13020206>

11. Tian, Q., Cai, R., & Luo, Y. (2024). DOA estimation based on an adversarial learning network via small antenna arrays. IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 47(4), 226-232. DOI: [10.1109/ICJECE.2024.3472657](https://doi.org/10.1109/ICJECE.2024.3472657)

12. He, W., Shi, Y., Wang, J., & Zhao, H. (2026). A Low-SNR DOA Estimation Model Based on Sequential and Convolutional Feature Fusion. Sensors, 26(10), 3093. <https://doi.org/10.3390/s26103093>

13. Loktionov, E.Yu., Protasov, Yu.S., Protasov, Yu.Yu., Telekh, V.D. & Khaziev, R.R. (2013). Razrabotka metodiki kombinirovannoi interferometrii svetoerozionnykh potokov i kompleksnoi avtomatizirovannoi obrabotki ee rezul'tatov. Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii, (10(22)), 38. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-10-1037](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-10-1037)

14. Aounallah, N., Bekhta, M. & Kina, A. (2024). Direction of arrival estimation methods for coherent and non-coherent sources. Journal of Smart Antenna Systems, 12(4), 112-128.

15. Dmitriev, D.D. & Kartsan, I.N. (2016). Adaptivnye antennye reshetki s tsifrovym formirovaniem luchy. Reshetnevskie chteniya, 1(20), 263-265. <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnye-antennye-reshetki-s-tsifrovym-formirovaniem-lucha>

БЕЛСЕНДІ ШУ КЕДЕРГІЛЕРІ КӨЗДЕРІН ПЕЛЕНГАЦИЯЛАУ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа. Жұмыста радио сәулелену көздерінен келетін немесе объектілерден шағылысу нәтижесінде пайда болатын радио толқындарының таралу бағытын белгілеу арқылы объектілердің бұрыштық жағдайын анықтау тәсілдері зерттеледі. Зерттеу "жасанды интеллект технологиясы негізінде ЛА радио сәулелену көздерін пассивті бағыттау міндеттері үшін аппараттық-бағдарламалық кешенді әзірлеу" ғылыми-техникалық жобасын гранттық қаржыландыру шеңберінде орындалады (03.10.2025 ж. №332/23-25 шарт, №Ар 327016/0225 жобасы). Зерттеулер жүргізу Қазақстан Республикасы Қарулы Күштері Қорғаныс Министрінің бірінші орынбасары - Қазақстан Республикасы Қарулы Күштері Бас штабы бастығының 2023 жылғы 18 қарашадағы № 62-3-4068 шешіміне сәйкес жүзеге асырылады. Көрсетілген бағыт шеңберінде әскери Радиотехника және электроника негіздері кафедрасында радио сәулелену көздеріне бағытты пассивті анықтаудың заманауи әдістерін кешенді зерделеу жүргізіледі. Қазіргі заманғы радиопеленгацияда радиосәулелену көздерінің, соның ішінде белсенді кедергілер қояушы құралдардың бұрыштық координаттарын дәл және жедел анықтау маңызды міндет болып қала береді. Бұл көп сәулелі таралудың күрделі жағдайларында өлшеу дәлдігі, байламның бір мәнділігі және жабдықтың кедергіге төзімділігі арасындағы ымыраны табуды талап етеді. Бұл жұмыста амплитудалық және фазалық пеленгациялау әдістерінің техникалық шектеулерін жүйелеу және оларды еңсеру жолдарын іздеу мақсатында салыстырмалы теориялық талдау жүргізіледі. Радиотехникалық жүйелерді математикалық талдау және мамандандырылған әдебиеттерді аналитикалық қорыту әдістерін қолдана отырып, аппаратура сезімталдығының антенналық жүйелердің геометриясына тәуелділігіне бағалау жүргізілді. Қосымша d/λ қатынасын, сигнал/шу қатынасын және сигналдың келу бұрышын өзгерте отырып, Монте-Карло әдісімен фазалық пеленгациялау әдісіне сандық модельдеу жүргізілді. Талдау көрсеткендей,

классикалық амплитудалық максимум әдісінің пеленгациялық сезімталдығы төмен. Фазалық әдістер, керісінше, жоғарырақ дәлдікті қамтамасыз етеді, алайда антенналар арасындағы қашықтық ұлғайған сайын олар пеленгтің көп мәнділігі (бір мәнді еместігі) мәселесімен бетпе-бет келеді. Жүргізілген жұмыстың нәтижесінде қажетті дәлдікке және өлшеулердің бір мәнділігіне қол жеткізу үшін аралас көп арналы тәсілдерді пайдалану неғұрлым орынды деген қорытынды жасалды. Сонымен қатар, сигналдарды цифрлық өңдеудің заманауи алгоритмдерін (мысалы, MUSIC алгоритмін) енгізу және бейімделгіш антенналық торларды қолдану көп сәулеліліктің тұрақсыздандырушы факторларының әсерін өтей алады.

Түйін сөздер: амплитудалық пеленгация, фазалық пеленгация, анықтау аймағы, белсенді кедергілерді қоюшы, сигнал, пеленг, шуга төзімділік.

METHODS FOR DIRECTION FINDING OF ACTIVE NOISE JAMMING SOURCES

Abstract. The paper examines approaches to determining the angular position of objects by establishing the direction of propagation of radio waves coming from radio emission sources or formed as a result of reflection from objects. The study is carried out within the framework of grant funding for the scientific and technical project “Development of a hardware and software complex for passive direction finding of radio emission sources of aircraft based on artificial intelligence technology” (contract No. 332/23-25 dated 03.10.2025, project No. AR 327016/0225). Research is also carried out in accordance with the decision of the First Deputy Minister of Defense of the Armed Forces of the Republic of Kazakhstan - Chief of the General Staff of the Armed Forces of the Republic of Kazakhstan dated November 18, 2023, No. 62-3-4068. Within the framework of this area, the Department of Fundamentals of Military Radio Engineering and Electronics conducts a comprehensive study of modern methods for passively determining the direction to radio emission sources. In modern radio direction finding, the accurate and rapid determination of the angular coordinates of radio emission sources, including active jammers, remains a critical task. This requires finding a compromise between measurement accuracy, unambiguous positioning, and equipment noise immunity under complex multipath propagation conditions. This paper conducts a comparative theoretical analysis of amplitude and phase direction-finding methods to systematize their technical limitations and identify ways to overcome them. Using methods of mathematical analysis of radio engineering systems and analytical synthesis of specialized literature, the dependence of equipment sensitivity on the geometry of antenna systems is evaluated. Additionally, numerical modeling of the phase direction-finding method was conducted using the Monte Carlo method by varying the d/λ ratio, signal-to-noise ratio, and signal arrival angle. The analysis shows that the classical amplitude maximum method has low direction-finding sensitivity. Phase methods, conversely, provide higher accuracy; however, as the distance between antennas increases, they encounter the problem of bearing ambiguity. As a result of the study, it is concluded that to achieve the required accuracy and unambiguous measurements, it is most expedient to use combined multichannel approaches. Furthermore, the implementation of modern digital signal processing algorithms (e.g., the MUSIC algorithm) and the use of adaptive antenna arrays can compensate for the impact of destabilizing multipath factors.

Keywords: amplitude direction finding, phase direction finding, detection zone, active jammer, signal, bearing, noise immunity.

Сведение об авторах

Аишев Аскар Ашимович	преподаватель кафедры основ военной радиотехники и электроники Военно-инженерного института радиоэлектроники и связи, подполковник E-mail: aisevaskar@gmail.com
Зикирьяев Нуржан Болатович	PhD, заместитель начальника кафедры основ военной радиотехники и электроники Военно-инженерного института радиоэлектроники и связи, подполковник E-mail: nurzhan.zikiryaev@bk.ru
Досжанов Ерлан Оспанович	PhD, ассоциированный профессор кафедры ЮНЕСКО по устойчивому развитию, Farabi University, E-mail: Yerlan.Doszhanov@kaznu.edu.kz
Нысанбаева Гульнура Рыскуловна	PhD, ассоциированный профессор кафедры «Общеобразовательные дисциплины», Академия Гражданской Авиации, E-mail: gulnur.83.29@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Аишев Аскар Ашимович	Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты әскери радиотехника және электроника негіздері кафедрасының оқытушысы, подполковник, E-mail: aisevaskar@gmail.com
Зикирьяев Нуржан Болатович	PhD, Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты әскери радиотехника және электроника негіздері кафедрасы бастығының орынбасары, подполковник, E-mail: nurzhan.zikiryaev@bk.ru
Досжанов Ерлан Оспанович	PhD, Тұрақты даму бойынша ЮНЕСКО кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Farabi University, E-mail: Yerlan.Doszhanov@kaznu.edu.kz
Нысанбаева Гульнура Рыскуловна	PhD, «Жалпы білім беретін пәндері» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Азаматтық Авиация Академиясы E-mail: gulnur.83.29@mail.ru

Information about the authors

Aishev Askar	Lecturer at the Department of Fundamentals of Military Radio Engineering and Electronics, Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Lieutenant Colonel, E-mail: aisevaskar@gmail.com
Zikiryaev Nurzhan	PhD, Deputy Head of the Department of Fundamentals of Military Radio Engineering and Electronics, Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Lieutenant Colonel, E-mail: nurzhan.zikiryaev@bk.ru
Doszhanov Yerlan	PhD, Associate Professor of the UNESCO Chair on Sustainable Development, Farabi University, E-mail: Yerlan.Doszhanov@kaznu.edu.kz
Nyysanbayeva Gulnura	PhD, Associate Professor, Department of General Education Disciplines, Civil Aviation Academy, E-mail: gulnur.83.29@mail.ru