

# Обнаружение следов кораблей и подводных лодок с помощью высокочастотного радара

А. А. Иванов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

aaivanov1@stud.etu.ru

**Аннотация.** Радиолокационные системы высокой частоты (HF) традиционно применяются для обнаружения морских объектов по их отраженным сигналам. Однако альтернативным методом является анализ следа Кельвина, возникающего вследствие движения кораблей и подводных лодок. В данном докладе рассматриваются исследования радиолокационных характеристик следа Кельвина, его доплеровские спектры и зависимость от параметров судна, включая форму корпуса, скорость и глубину погружения. Обсуждаются возможности использования метода для повышения точности обнаружения, классификации морских целей и улучшения эффективности радиолокационных систем в сложных условиях наблюдения.

**Ключевые слова:** загоризонтная локация; след Кельвина; классификация

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии радиолокации на основе высокочастотных (ВЧ) систем играют ключевую роль в детекции морских объектов, таких как корабли и подводные лодки, благодаря их способности фиксировать сигнатуры, образуемые следами этих объектов. Одной из перспективных областей применения таких технологий является детекция следов, оставляемых движущимися объектами на поверхности воды. В частности, использование сигнатур Кельвинова следа и других феноменов, связанных с движением судов, позволяет повысить точность и надёжность обнаружения даже в сложных условиях.

## II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ СЛЕДОВ

Движение морских объектов, таких как корабли и подводные лодки, создаёт разнообразные гидродинамические возмущения, которые могут быть зафиксированы радиолокационными системами. [7] Среди них наиболее важными для задач радиолокации являются Кельвинов след — это характерный узор волн, образующихся позади движущегося объекта в жидкости. В случае подводных лодок этот след формируется на поверхности воды в результате взаимодействия водного потока с корпусом судна.

### A. Подробное описание Кельвинова следа

След формируется двумя основными компонентами: поперечными и расходящимися волнами. Характерная V-образная форма следа обусловлена законами гравитационной волновой динамики, а угол раскрытия следа равен приблизительно  $39^\circ$ . [6] Поперечные волны расположены практически перпендикулярно направлению движения объекта и имеют меньшую скорость распространения, чем расходящиеся. Расходящиеся волны, в свою очередь, распространяются под острым углом к траектории движения и являются основной составляющей радарной сигнатуры Кельвинова следа.

Наиболее значимым аспектом является энергетическая структура следа. Исследования показывают, что энергия, передаваемая объектом в волновую систему, распределяется в зависимости от скорости и формы объекта. Так, для типичных надводных судов соотношение энергии волн следа к фоновым волнам достигает больших значений при умеренных скоростях и низком ветре (менее 4 м/с). Для подводных лодок, находящихся на глубинах менее 10 метров, влияние на поверхность также оказывается заметным, хотя с увеличением глубины амплитуда волн резко уменьшается.

Современные математические модели, такие как уравнения Кельвина–Мичелла, позволяют вычислять точные параметры следа для различных условий. Эти модели учитывают гидродинамическую форму корпуса, скорость объекта, глубину погружения (для подводных лодок) и состояние морской поверхности. [8] Например, использование приближений тонкого корпуса позволяет эффективно моделировать следы для фрегатов и подводных лодок при разных скоростях и условиях моря.

Эмпирические данные также подтверждают высокую корреляцию между характеристиками следа и параметрами объекта. Эксперименты, проводимые с использованием ВЧ-радаров, показали, что Кельвинов след может быть обнаружен на расстоянии до 10–15 км в условиях низкой турбулентности моря. Более того, различия в структуре следов позволяют не только выявить наличие объекта, но и классифицировать его тип.

Эффективность детекции Кельвинова следа усиливается благодаря использованию Доплеровского анализа. Распределение скоростей волновых фронтов внутри следа создаёт характерный спектральный сдвиг, который можно выделить из фонового шума. Этот подход особенно актуален для задач обнаружения подводных лодок, поскольку их низкая радиолокационная заметность компенсируется характерными гидродинамическими возмущениями.

ВЧ-радар фиксирует отражённый сигнал от возмущений поверхности и анализирует их частотный спектр. [5] Доплеровское смещение вызывается движением волн, формирующихся в следе Кельвина:

$$f_D = \frac{2U}{\lambda} \cos\theta$$

где:  $f_D$  — доплеровское смещение;  $\lambda$  — длина волны радара;  $\theta$  — угол между направлением движения подлодки и линией визирования радара.

Если присутствует след Кельвина, можно ожидать наличие дополнительных компонент в спектре, соответствующих волнам следа.

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ КЕЛЬВИНОВА СЛЕДА

Моделирование Кельвинова следа представляет собой сложную задачу, требующую учета множества гидродинамических и физических факторов. Основой для моделирования является теория линейных волн, которая позволяет описать взаимодействие движущегося объекта с поверхностными волнами. [2] Согласно этой теории, движение судна приводит к образованию V-образной структуры волн, где углы зависят от скорости объекта и параметров среды.

Для численного моделирования используются такие подходы, как метод точечных источников, которые описывают возмущения, создаваемые движущимся телом. В рамках этого метода поверхность моря представляется в виде суперпозиции волн, порожденных множеством точечных источников, равномерно распределённых вдоль корпуса судна. Эти волны затем суммируются для получения общего следа. Расчеты показывают, что основное влияние на форму следа оказывают скорость объекта и его геометрические параметры, такие как длина корпуса и соотношение ширины к длине.

Дополнительно, учитываются эффекты взаимодействия с окружающей средой, такие как скорость ветра и состояние моря. Исследования показывают, что при ветровой скорости ниже 4 м/с сигнатура Кельвинова следа наиболее заметна. При более высоких скоростях ветра возрастает влияние фоновых волн, что усложняет детекцию.

Особое внимание уделяется моделированию следов подводных лодок, где глубина погружения играет критическую роль. [1] Если подводная лодка движется с постоянной скоростью  $U$  на глубине  $h$ , то средняя амплитуда волн следа Кельвина может быть представлена как:

$$\eta(x, y) = Ae^{-\alpha h} \cos(kx - \omega t)$$

где:  $A$  — амплитуда волн;  $\alpha$  — коэффициент затухания, зависящий от характеристик воды;  $h$  — глубина подводной лодки;  $x, y$  — координаты на поверхности.

С увеличением глубины  $h$  экспоненциальный множитель приводит к значительному ослаблению следа на больших глубинах. При глубине до 10 метров Кельвинов след остается выраженным, но его амплитуда уменьшается с увеличением глубины, что ограничивает возможности его обнаружения.

### IV. РАССЕЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СЛОЖНЫХ МОРСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Рассеяние ВЧ-излучения на сложных морских поверхностях является ключевым фактором, определяющим возможности радиолокационной системы в условиях реального моря. [4] Морская поверхность, состоящая из множества взаимодействующих волн, создает сложное поле отражений, которые зависят от высоты волн, их длины, скорости ветра и других параметров. Основным подходом к анализу рассеяния является использование

теории малых возмущений, которая описывает взаимодействие падающей волны с неровной поверхностью.

Согласно этой теории, мощность отраженного сигнала определяется спектром волн на морской поверхности. Волны Брэгга, чья длина соответствует половине длины падающей электромагнитной волны, играют ключевую роль в формировании рассеянного сигнала. Например, для ВЧ-радаров с длиной волны порядка нескольких метров основные отражения обусловлены гравитационно-капиллярными волнами, которые существуют на поверхности моря.

Современные исследования показывают, что поляризация сигнала играет важную роль в улучшении точности детекции. Отражения от гладких поверхностей обладают сильной зависимостью от угла падения и поляризации волны, что позволяет выделять сигналы, отраженные от морской поверхности, на фоне других источников. Поляриметрические данные также позволяют различать сигналы, вызванные следами объектов, таких как корабли или подводные лодки, и естественными морскими возмущениями.

Использование бистатических и многостатических конфигураций радаров позволяет минимизировать влияние сложных условий моря. В таких системах несколько приёмных станций регистрируют сигналы под различными углами, что даёт возможность реконструировать более точное изображение поверхности и выделить сигнатуры следов. Эти методы особенно эффективны для задач обнаружения объектов в условиях низкой радиолокационной заметности.

### V. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СИГНАТУР

Одной из ключевых задач радиолокации является классификация объектов на основе их уникальных сигнатур. В случае кораблей и подводных лодок эта задача осложняется схожестью многих характеристик, таких как размеры и скорость движения. Однако благодаря использованию современных математических моделей и алгоритмов обработки данных, стало возможным выделение специфических признаков, которые позволяют различать объекты даже в условиях высокой загруженности акватории.

Например, подводные лодки создают менее выраженные следы на поверхности по сравнению с надводными кораблями, однако их структура может быть выделена с помощью высокочувствительных методов обработки данных. Кроме того, различия в углах и частоте волн, формируемых разными типами объектов, позволяют создавать базы данных сигнатур, которые используются для обучения систем классификации.

С развитием технологий искусственного интеллекта и машинного обучения классификация объектов с помощью ВЧ-радаров стала более точной и автоматизированной. Алгоритмы глубокого обучения позволяют анализировать большие массивы данных, полученных в реальных или смоделированных условиях, и выявлять скрытые закономерности, которые невозможно обнаружить с помощью традиционных методов. Это открывает новые возможности для применения ВЧ-радаров в задачах мониторинга и безопасности.

## VI. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время обнаружение судов по Кельвинову следу происходит с помощью спутниковых радиолокационных систем с синтезированной апертурой (SAR), что остается сложной, но перспективной задачей. Кельвинов след, представляющий собой расходящиеся гравитационные волны с характерным углом  $39^\circ$  от курса судна, чаще всего фиксируется в высокоразрешающих SAR-изображениях [3] (например, RADARSAT-1 и Sentinel-1). Однако его видимость зависит от ряда факторов, включая скорость и размер судна, направление и скорость ветра, а также угол наблюдения радара. Кельвинов след лучше различим при умеренных ветровых условиях (3–10 м/с), особенно при низких углах падения сигнала и при горизонтальной поляризации (HH). Современные алгоритмы автоматического обнаружения стремятся учитывать эти параметры, но из-за переменчивости условий на море вероятность успешного выявления Кельвинова следа остается ниже, чем у турбулентных следов. Тем не менее, интеграция SAR-данных с другими методами, такими как автоматические системы идентификации судов (AIS), а также развитие многополяриметрических и многоспектральных методов обработки изображений, повышает точность и надежность детекции судов по их волновым следам.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ продемонстрировал значительный потенциал использования ВЧ-радаров для детекции следов морских объектов, таких как корабли и подводные лодки. Уникальные свойства Кельвинова следа, детально изученные и описанные в ходе исследования, открывают новые возможности для повышения точности и надёжности обнаружения. Однако использование ВЧ-радаров сопряжено с рядом вызовов, включая необходимость различения сигнала следа от фонового шума и учёт множества факторов окружающей среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] S.J. Anderson, "HF radar signatures of ship and submarine wakes", J. Engineering, vol. 2019, no. 21, pp. 7512-7520.
- [2] S.J. Anderson, M. Jones, T. Williams, "Prospects for Submarine Detection with HF Over-the-horizon Radar," ResearchGate
- [3] W.G. Pichel, P. Clemente-Colón, C.C. Wackerman, and K.S. Friedman, "Chapter 12. Ship and Wake Detection," in Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual, NOAA/NESDIS, Camp Springs, MD, USA, 2004.
- [4] S.J. Anderson, "Bistatic and stereoscopic configurations for HF radar", Remote Sensing, vol. 2020(12), 689.
- [5] E.O. Tuck, J.L. Collins and W.H. Wells, "On ship waves and their spectra", J. Ship Research, March 1971, pp. 11-21.
- [6] J.M. Headrick, "Kelvin wake as a HF radar target", NRL Technical Memorandum, 5309, August 1998.
- [7] Carusotto L, Rousseaux G. 'The Cerenkov effect revisited: from swimming ducks to zero modes in gravitational analogs'. arXiv:1202.3494v1 [physics.class-ph], 16 Feb 2012.
- [8] Tuck E.O., Scullen D.C., Lazauskas, L. 'Ship-wave patterns in the spirit of Michell'. Proc. Of the IUTAM Symp. on Free-Surface Flows, Birminghams, UK, July 2000, pp. 311–318.