

АНТЕННЫ, СВЧ-УСТРОЙСТВА И ИХ ТЕХНОЛОГИИ / ANTENNAS, MICROWAVE DEVICES AND THEIR TECHNOLOGIES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14>

ИСКАЖЕНИЯ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН СРЕДНЕВОЛНОВЫХ НАЗЕМНЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ИЗ-ЗА МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Научная статья

Панько В.С.^{1*}, Князева К.В.²¹ ORCID : 0000-0001-5499-1880;¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vas2006[at]bk.ru)

Аннотация

Проведено моделирование многолучевого распространения сигнала на частоте 1,9 МГц для различных положений переизлучающих объектов относительно передающей антенны. Рассмотрены объекты в виде вертикального штыря, мачты, плоского экрана и опор различной формы. Рассчитаны фазовые диаграммы направленности системы «передающая антенна + окружающие предметы», затем с помощью математической обработки вычислена неравномерность фазовой ДН по азимуту. Вычисления проведены для различных расстояний между антенной и отражающим объектом и различной высоты отражающего объекта. Показано, что искажения фазовой диаграммы направленности величиной более 10 градусов могут иметь место на расстояниях между отражающим объектом и антенной до 500 м и более. Большое значение имеют высота и форма объекта.

Ключевые слова: наземная радионавигационная система, средневолновый диапазон, приемная антенна, переизлучение навигационных сигналов, неравномерность фазовой диаграммы направленности.

DISTORTIONS OF THE PHASE PATTERN OF ANTENNAS OF MEDIUM-WAVE TERRESTRIAL RADIONAVIGATION SYSTEMS DUE TO MULTIPATH PROPAGATION

Research article

Panko V.S.^{1*}, Knyazeva K.V.²¹ ORCID : 0000-0001-5499-1880;¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (vas2006[at]bk.ru)

Abstract

Modelling of multipath signal propagation at a frequency of 1.9 MHz for different positions of re-propagating objects relative to the transmitting antenna is carried out. The objects in the form of a vertical pin, a mast, a flat screen and supports of different shapes are examined. The phase diagrams of the system "transmitting antenna + surrounding objects" have been calculated, then the non-uniformity of the phase DD along the azimuth has been calculated using mathematical processing. The calculations were carried out for different distances between the antenna and the reflecting object and different heights of the reflecting object. It is demonstrated that distortions of the phase diagram of directivity with the value more than 10 degrees can take place at distances between the reflecting object and the antenna up to 500 m and more. The height and shape of the object are of great importance.

Keywords: ground-based radio navigation system, medium-wave band, receiving antenna, navigation signal over-radiation, phase direction diagram non-uniformity.

Введение

Спутниковая навигация, благодаря глобальной зоне действия, всепогодности, точности, низкой стоимости для потребителей, стала основным, а иногда и единственным источником навигационной информации для морских объектов. В то же время на фоне повсеместного проникновения спутниковой навигации в различные области человеческой деятельности, в последнее время все большее внимание уделяется вопросам ее надежности, достоверности, точности. Основным недостатком спутниковых навигационных систем является низкая помехоустойчивость, по отношению к непреднамеренным и специально формируемым помехам: заградительным и имитационным [1], [2]. Низкая помехоустойчивость спутниковых навигационных систем вызвана крайне малым уровнем радиосигнала у поверхности Земли, вследствие большой удаленности до навигационных космических аппаратов. Ожидается, что в дальнейшем ситуация с надежностью спутниковой навигации будет ухудшаться, в том числе и из-за увеличения доступности аппаратуры постановки помех [3].

В последнее время, при поиске надежных источников навигационной информации для морских потребителей все большее внимание уделяется локальным навигационным системам с наземным расположением передающих станций. Более того, в РФ применение комбинированных каналов приема сигналов, работающих как по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, так и по сигналам наземных систем радионавигации является обязательным требованием Правил по оборудованию морских судов [4]. Аналогичным образом обстоит ситуация за рубежом. В частности, с 2016 г. ведется разработка наземной РНС eLORAN в Республике Корея [5] и уже продемонстрированы

первые результаты [6]. В Великобритании проведено исследование, посвященное вопросам надежности, целостности и доступности навигационной информации для морских судов [7]. Результатом работы стал вывод о необходимости резервной навигационной системы.

Требуемая точность определения координат в наземных радионавигационных системах (РНС) составляет несколько метров или даже меньше в отдельных приложениях РНС. Одним из факторов, приводящих к ухудшению точности позиционирования, является многолучевое распространение сигнала, т.е. переизлучение сигнала от окружающих антенну объектов. В реальной ситуации очень сложно, если вообще возможно, выбрать размещение передающей антенны РНС на достаточном удалении от каких-либо объектов – опор линий электропередачи (ЛЭП), строительных кранов, зданий и так далее. Поэтому важной задачей является определение минимального расстояния от антенны до таких объектов и их максимальные размеры, которые можно считать приемлемыми.

Методы и принципы исследования

На приемную антенну РНС помимо прямой волны от базовой станции, содержащей полезную информацию (время распространения сигнала), приходит еще волна, отраженная от объектов, окружающих приемную антенну (мачты, краны, здания и т.д.). Переизлучение волн от проводящих объектов можно объяснить следующим образом. Электромагнитная волна, излучаемая антенной базовой станции, достигает проводящего объекта и индуцирует поверхностный ток. Индуцированный поверхностный ток, в свою очередь, создает вторичную электромагнитную волну, распространяющуюся от проводящего объекта. Амплитуда и фаза новой переизлученной волны будут зависеть от частоты, формы и положения отражающего объекта. Таким образом, на вход приемника от антенны поступает сумма двух сигналов: прямого (несущего полезную информацию) и переизлученного. В общем случае фаза этой суммы будет отличаться от фазы прямого сигнала. В результате для сложно-модулированного сигнала при наличии отражений будут возникать ошибки как по фазе, так и по задержке.

Подробный обзор проблемы переизлучения и возможных способов борьбы с ним приведен в [8]. В работах [9], [10], [11], [12], [13] представлены результаты последних исследований, описывающие влияние отражающих объектов на амплитудные диаграммы направленности средневолновых АМ-радиостанций.

Целью всех вышеперечисленных исследований была оценка изменений амплитудной диаграммы направленности, тогда как для задач радионавигации основной интерес представляют фаза и групповое время запаздывания сигнала. Таким образом, актуальной задачей является анализ изменений фазовой диаграммы направленности (ФДН) передающей антенны РНС в присутствии отражающих объектов.

Целью настоящего исследования является выработка рекомендаций о минимально допустимом расстоянии между антенной и отражающими объектами, при котором искажения формы ФДН находятся в приемлемых пределах. Для этого следует провести электродинамическое моделирование ситуаций размещения передающей антенны РНС вблизи отражающих объектов различной формы, определить величину фазовых искажений в зависимости от расстояния до отражающих объектов и их размеров, и выполнить оценку неравномерности ФДН.

Основные результаты

В ходе работы выполнено моделирование антенны при наличии различных окружающих объектов, расположенных на плоской горизонтальной поверхности. Для всех моделей передающая антенна представляет собой вертикальный несимметричный монополюс длиной 22 м с радиальным наземным экраном и опорными растяжками. Она размещается в начале координат и работает в диапазоне средних частот.

В отсутствие окружающих объектов (идеальный случай) передающая антенна РНС излучает во всех направлениях равномерно, а фазовая диаграмма направленности представляет собой круг. Отражающий объект, расположенный вблизи антенны, возбуждается передаваемым сигналом и переизлучает часть энергии с определенной амплитудой и фазой. В результате фазовая диаграмма направленности системы «антенна — отражающий объект» отличается от круга. Это приводит к систематической ошибке определения псевдодальности, которая зависит от взаимного положения пользователя РНС и базовой станции. Например, фазовая ошибка всего в 10° приведет к ошибке псевдодальности примерно $\lambda/36$, что равно 4,4 метра на частоте 1,9 МГц. Такие значения ошибок неприемлемы во многих ситуациях. Амплитудные диаграммы направленности также искажаются, однако на точность позиционирования в РНС в первую очередь влияет фаза сигнала.

Моделирование проводилось методом моментов. Антенна и отражающие объекты размещаются на «средней» земле. Для каждой модели рассчитаны азимутальные фазовые диаграммы направленности $\Phi(\varphi)$ в диапазоне частот 1–3 МГц, затем фазовая неравномерность оценивается как $\Delta\Phi = \max(\Phi(\varphi)) - \min(\Phi(\varphi))$ в пределах азимутального сектора $\varphi = 0 \dots 360^\circ$. Расчеты выполнены при изменении высоты отражающего объекта $h = 20 \dots 100$ м, и расстояния объекта от начала координат $R = 20 \dots 500$ м. Фазовая неравномерность отображается в виде контурной диаграммы $\Delta\Phi(h, R)$.

Рассматривается несколько статических объектов: вертикальный штырь, вертикальный штырь с противовесами, мачта, Г-образный проводник, П, Л, Т-образные опоры и плоский экран. Для всех моделей объекты состоят из идеальных электрических проводников (ЕЕС) радиусом 8 мм. Все представленные ниже результаты приведены для частоты $f = 1,9$ МГц.

Обсуждение

Первым переизлучающим объектом является вертикальный штырь высотой h , расположенный на расстоянии R от начала координат (рис. 1). Нижний конец штыря касается поверхности земли.

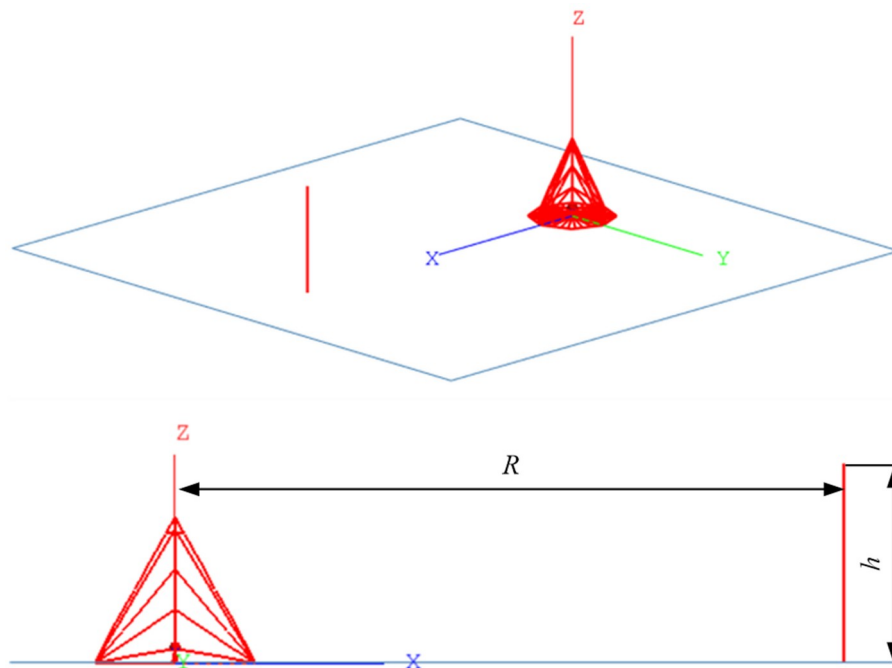


Рисунок 1 - Вертикальный штырь
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.1>

Фазовые диаграммы направленности, рассчитанные для этой простейшей модели, представлены на рис. 2. Верхняя и нижняя границы диаграммы показаны синими пунктирными кругами, а разность фаз $\Delta\Phi$ составляет $35,3^\circ$ для $R = 100$ м и $9,5^\circ$ для $R = 400$ м. Очевидно, что на больших расстояниях от антенны возбуждение отражающего объекта передаваемым сигналом слабее и разность фаз меньше.

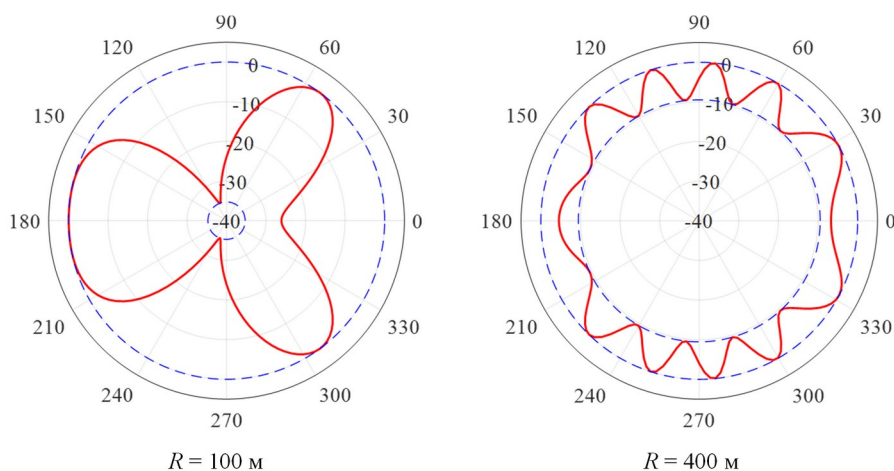


Рисунок 2 - Фазовая диаграмма направленности модели «вертикальный штырь» при различных расстояниях от начала координат

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.2>

Примечание: $h = 80$ м

Объекты размером, сравнимым с половиной длины волны, наиболее сильно возбуждаются и поэтому создают максимальную фазовую неравномерность. Объекты меньшей высоты возбуждаются меньше и их влияние на фазовую диаграмму менее существенно. Эта зависимость хорошо видна на рис. 3: половина длины волны на частоте 1,9 МГц составляет около 80 м, штырь такой высоты вносит значительную фазовую неравномерность даже на больших расстояниях от антенны. Однако объекты сложной формы могут иметь меньшую резонансную длину.

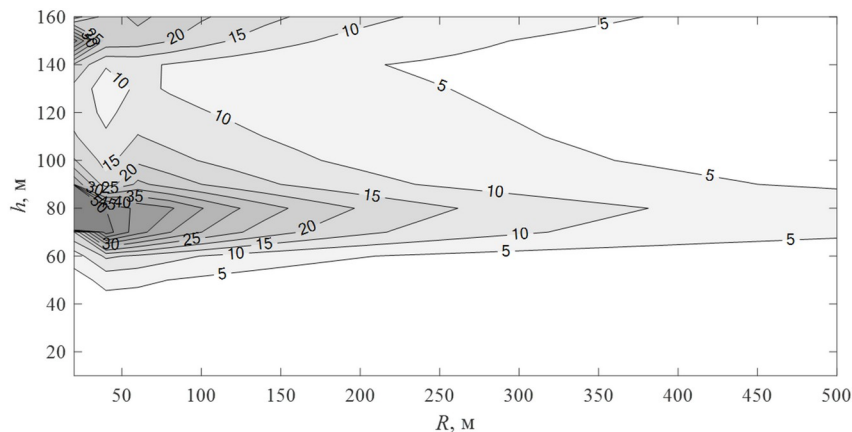


Рисунок 3 - Фазовая неравномерность для модели вертикального штыря
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.3>

Также был исследован штырь с двумя противовесами длиной $h/2$. Противовесы, расположенные на поверхности земли, почти вдвое увеличивают общую эквивалентную длину штыря, а максимальная фазовая неравномерность возникает на высоте 40 м (рис. 4), однако величина неравномерности уменьшается.

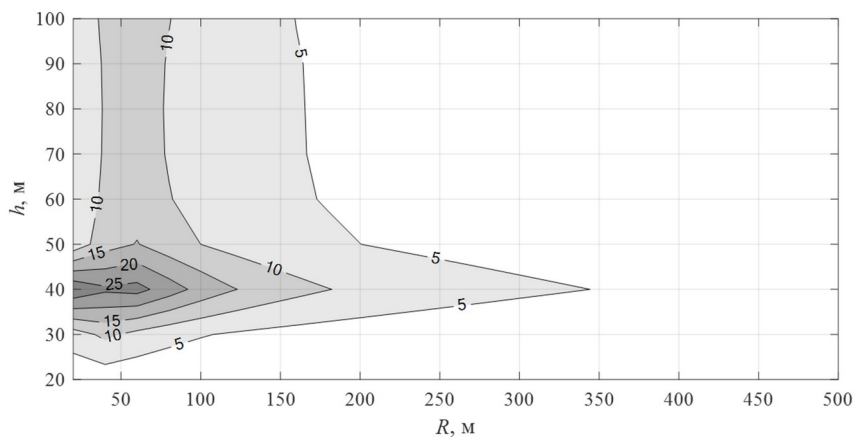


Рисунок 4 - Фазовая неравномерность для модели вертикального штыря с противовесами
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.4>

Объект «мачта» имитирует мачту башенного крана, опору ЛЭП или подобное сооружение. Объект состоит из одинаковых секций, образованных вертикальными проводниками, размещенными в углах квадрата со стороной 1,8 м (рис. 5). Высота секций 10 м, в основании секций вертикальные проводники соединены друг с другом четырьмя перемычками.

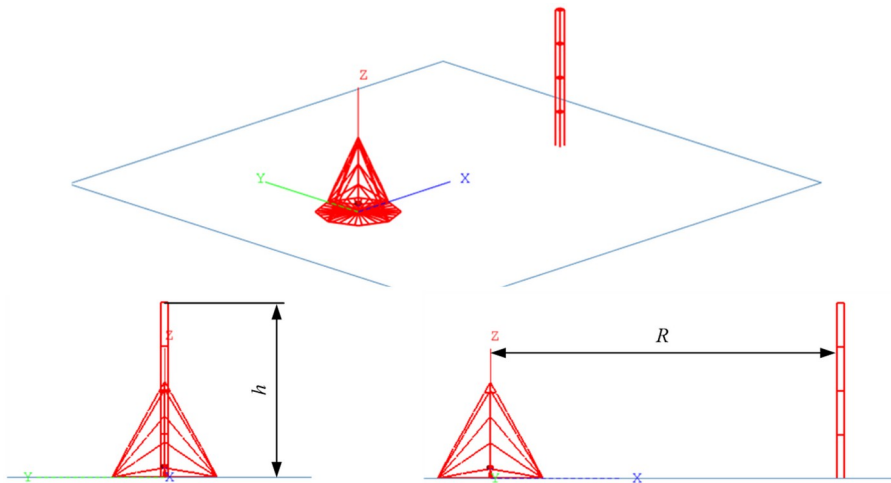


Рисунок 5 - Мачта
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.5>

Мачта имеет больший эквивалентный радиус по сравнению с тонким штырем и, следовательно, будет эффективно возбуждаться в более широком диапазоне частот. Другими словами, значительная фазовая неравномерность возникнет для мачт разного диапазона высот, что видно из рис. 6.

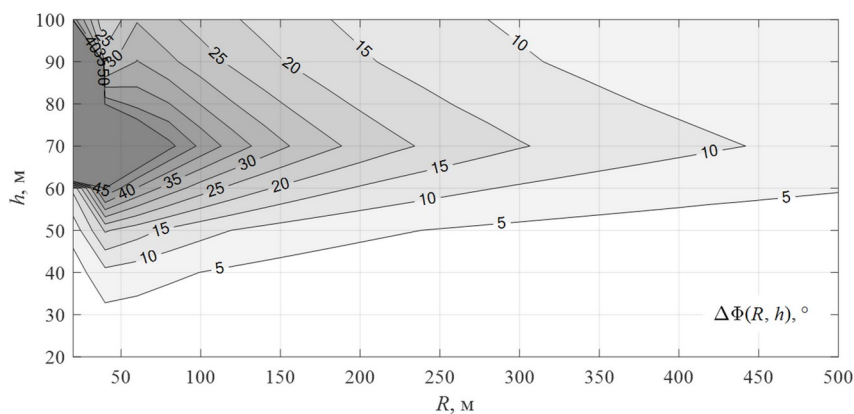


Рисунок 6 - Фазовая неравномерность для модели мачты
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.6>

Г-образный проводник имитирует башенный кран с вертикальной мачтой, горизонтальной стрелой и свисающим тросом (рис. 7). Размеры объекта: высота вертикальной части h , длина стрелы и кабеля $h/2$. Нижний конец вертикальной части касается поверхности земли.

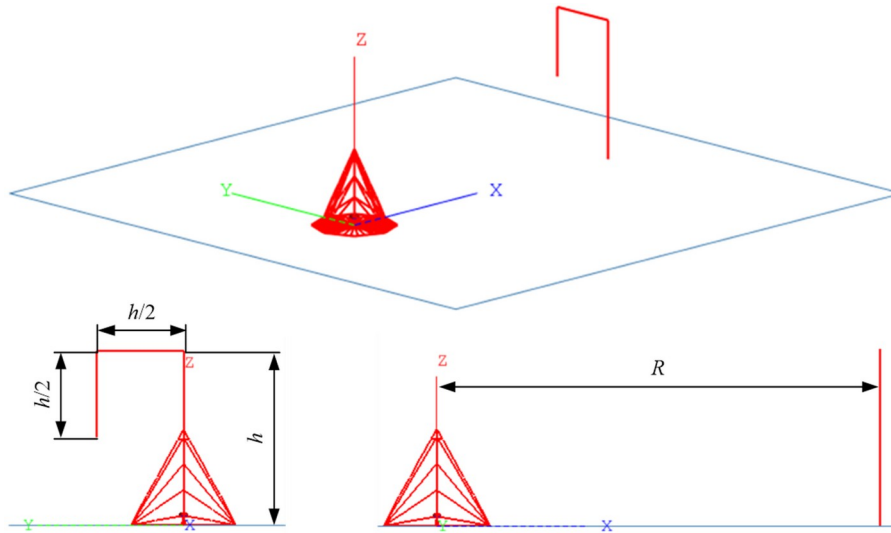


Рисунок 7 - Г-образный проводник
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.7>

Анализ фазовой неравномерности модели показывает, что объект такого типа имеет два «резонанса»: на высоте 40 и 80 м, рис. 8.

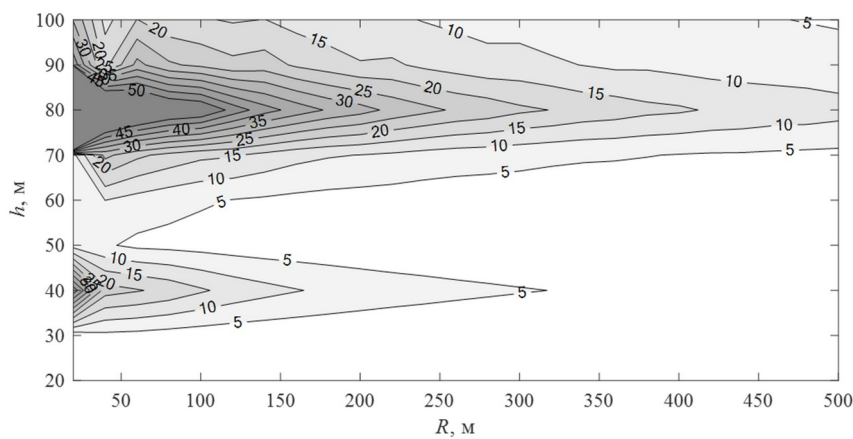


Рисунок 8 - Фазовая неравномерность для модели Г-образного проводника
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.8>

П, Л, Т-образные опоры имитируют опоры линий электропередачи или конструкции аналогичной формы высотой h и горизонтальным размером $h/2$. Нижние концы вертикальных частей касаются поверхности земли.

Общая длина П-образной опоры (рис. 9) составляет $2,5h$. Когда это значение равно длине волны, индуцированный ток максимален и опора становится резонансной. Для 1,9 МГц $\lambda \approx 158$ м и резонансная высота h составляет около 63 м. Из рис. 10 можно увидеть максимальную неравномерность фазы в области этого значения для разных R .

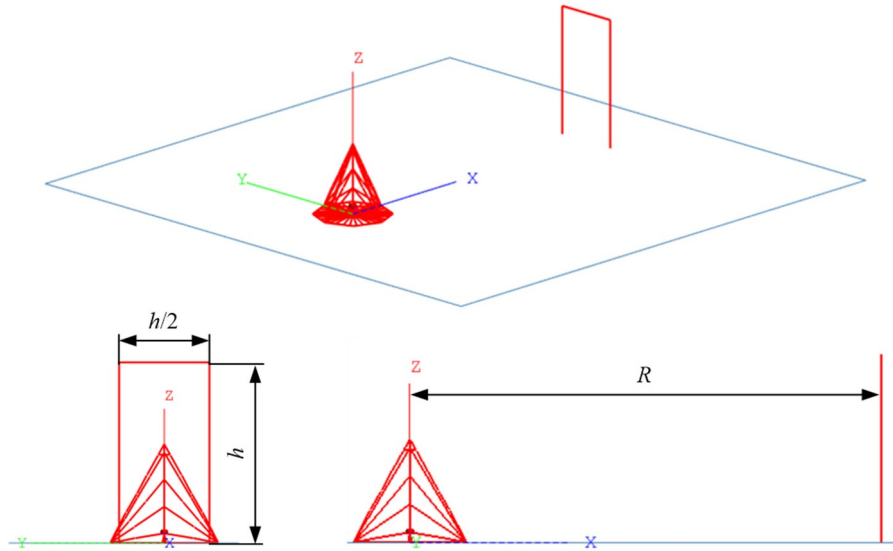


Рисунок 9 - П-образная опора
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.9>

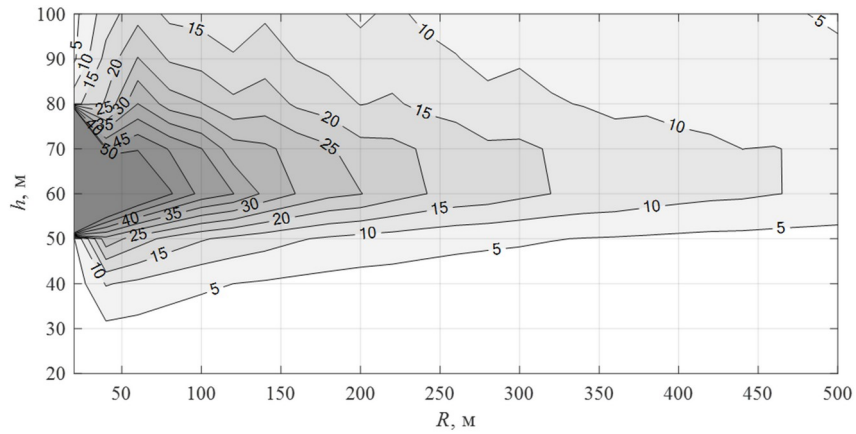


Рисунок 10 - Фазовая неравномерность для модели П-образной опоры
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.10>

Такая же ситуация имеет место и для опоры Л-образной формы (рис. 11).

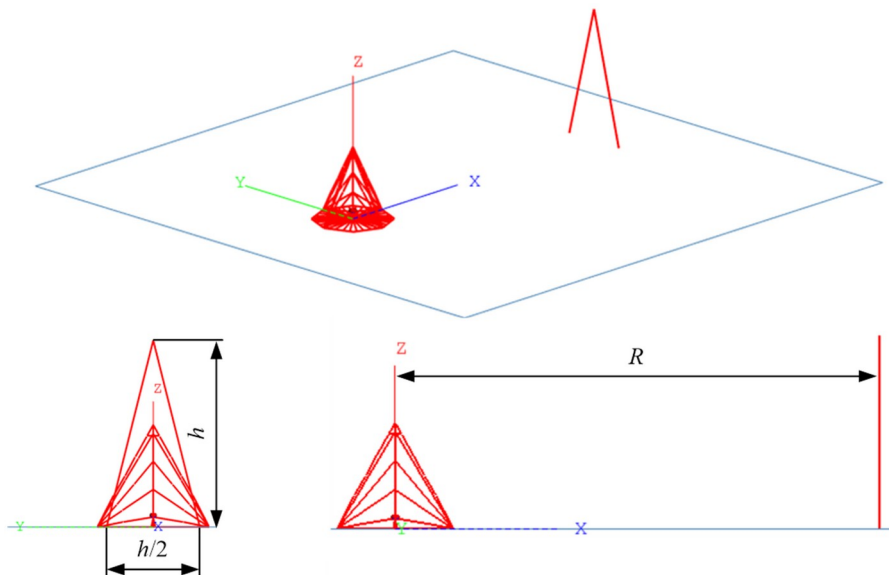


Рисунок 11 - Λ -образная опора
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.11>

Полную длину опоры можно найти, исходя из ее геометрии, как $2,06h$, и на частоте 1,9 МГц резонансная высота составляет около 76 м (см. рис. 12).

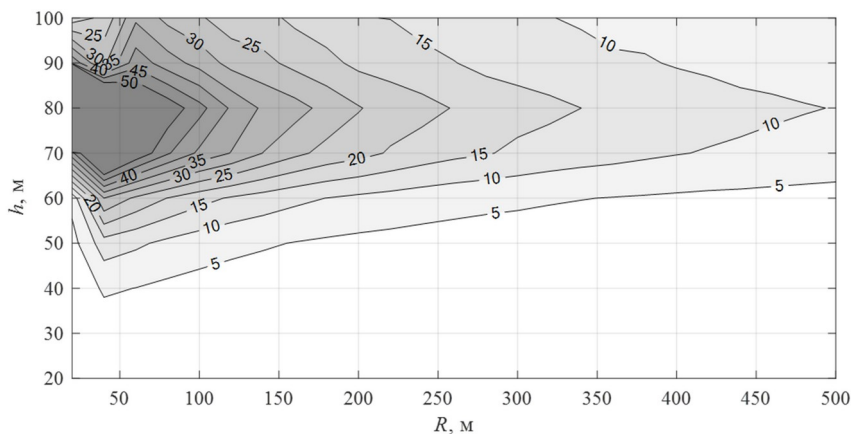


Рисунок 12 - Фазовая неравномерность для модели Λ -образной опоры
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.12>

T-образная опора (рис. 13) может рассматриваться как монополь с емкостной нагрузкой, уменьшающей резонансную высоту по сравнению с прямым вертикальным штырем (рис. 14).

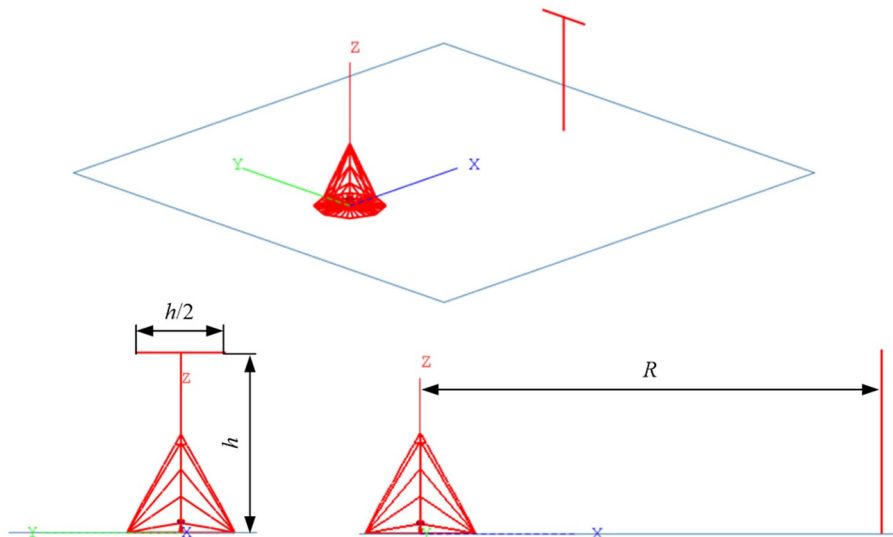


Рисунок 13 - Т-образная опора
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.13>

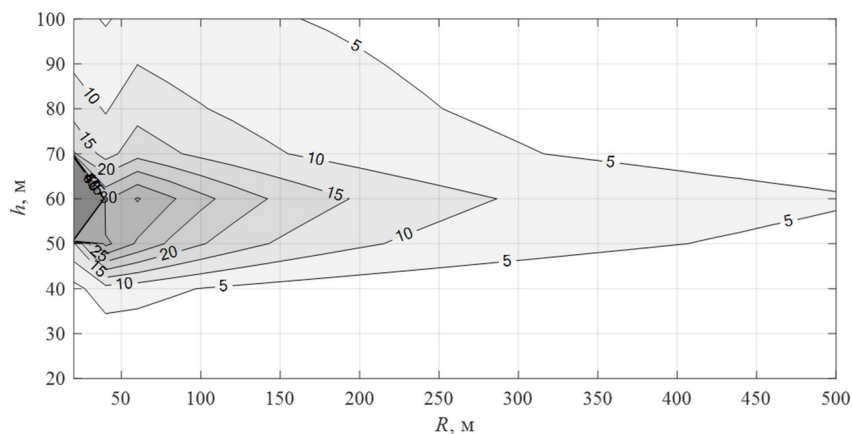


Рисунок 14 - Фазовая неравномерность для модели Т-образной опоры
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.14>

Плоский экран представляет собой прямоугольную сетку из проводников с шагом 2 м, имитирующую арматуру бетонной стены (рис. 15). Нижние концы вертикальных штырей касаются поверхности земли.

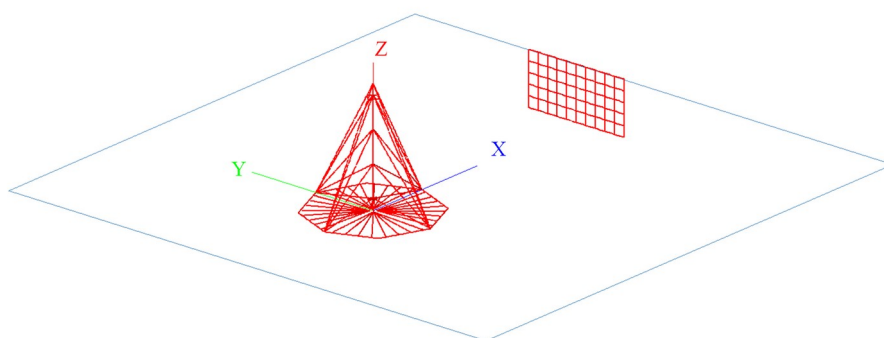


Рисунок 15 - Плоский экран
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.15>

Плоский экран приводит к большой неравномерности фазы в широком диапазоне высот объекта и расстояний до антенны. Так, фазовая ошибка 10° появляется на расстояниях до 150 м при высоте экрана всего 30 м (рис. 16), что эквивалентно 9-этажному зданию.

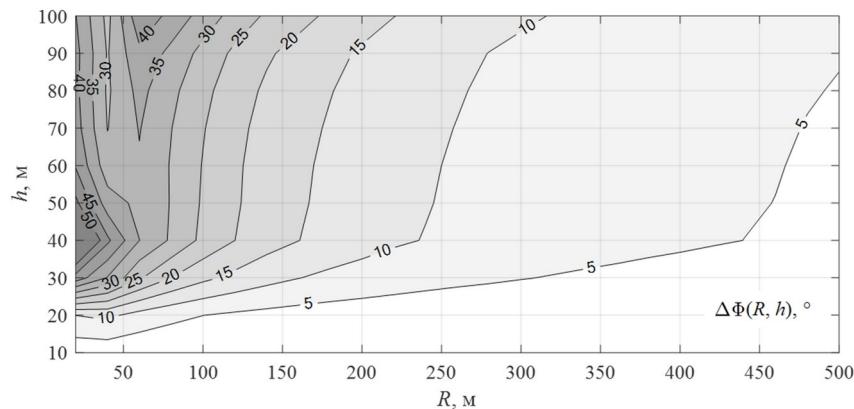


Рисунок 16 - Фазовая неравномерность для модели плоского экрана, ширина экрана 20 м
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.16>

Анализ полученных результатов

Из полученных выше результатов моделирования следует, что отражающие объекты могут внести в ФДН антенны искажения величиной в десятки градусов даже при небольших расстояниях до антенны порядка 100-200 метров. В качестве допустимого значения неравномерности ФДН передающей антенны примем величину 10° , что в первом приближении соответствует ошибке определения координат около 4 м для центральной рабочей частоты 1,9 МГц. Исходя из этой величины, можно определить минимально допустимое расстояние R_{\min} между антенной РНС и близлежащим отражающим объектом. Полученные значения сведены в таблицу для объектов разного типа и высоты объекта h . Проверка означает, что при данной высоте объекта на любом расстоянии его до антенны искажения ФДН менее 10° .

Таблица 1 - Минимально допустимое расстояние между антенной РНС и отражающим объектом

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.14.17>

Тип объекта	Высота объекта h , м			
	20	40	60	80
Вертикальный штырь	–	–	80	380
Вертикальный штырь с противовесами	–	180	80	60
Мачта	–	–	280	360
Г-образный проводник	–	160	40	>500
П-образная опора	–	40	460	320
Λ-образная опора	–	–	160	480
Т-образная опора	–	–	280	100
Плоский экран шириной 20 м	40	220	240	260

Из приведенных данных можно сделать следующие выводы. Отражающие объекты высотой 20 м и менее, кроме плоского экрана, могут не приниматься во внимание. Существенные искажения в форму ФДН вносят вертикальный штырь с противовесами, Г-образный проводник и П-образная опора, которые при высоте всего 40 м должны быть отнесены на расстояние не менее 200 м от антенны. Максимальное влияние на ФДН оказывает плоский отражающий экран (здание), и расположение объектов такого типа вблизи антенны следует анализировать отдельно в каждом конкретном случае. Все отражающие объекты высотой 80 м и более должны быть расположены не ближе 400 м от антенны.

Заключение

Результаты моделирования, представленные в данной работе, показывают, что проводящие объекты, расположенные вблизи передающей антенны наземной РНС, приводят к значительным искажениям ФДН антенны и

могут вызывать недопустимые ошибки в оценках координат пользователя. Величина искажения ФДН зависит от формы и высоты отражающих объектов, при этом наибольшие искажения вызывают объекты сложной структуры с высотой в четверть длины волны. При выборе мест размещения передающих антенн необходимо тщательно анализировать окружающую обстановку. Полученные в работе оценки позволяют с приемлемой для практического применения точностью определить допустимые минимальные расстояния от антенны до объектов различной формы и высоты.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 20231103-06114 «Исследование влияния многолучевого распространения навигационных сигналов на погрешность измерения координат в локальных радионавигационных системах».

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was supported by the Krasnoyarsk Regional Fund for Support of Scientific and Scientific-Technical Activity within the scientific project № 20231103-06114 "Study of the influence of multipath propagation of navigation signals on the error of coordinate measurement in local radio-navigation systems".

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Wu Z. Spoofing and Anti-Spoofing Technologies of Global Navigation Satellite System: A Survey / Z. Wu, Y. Zhang, Y. Yang [et al.] // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 165444–165496.
2. Li X. Overview of Jamming Technology for Satellite Navigation / X. Li, L. Chen, Z. Lu [et al.] // Machines. — 2023. — Vol. 11. — № 7.
3. Rados K. Recent Advances on Jamming and Spoofing Detection in GNSS / K. Rados, M. Brkic, D. Begusic // Sensors. — 2024. — Vol. 24. — № 13. — P. 4210–4218.
4. Навигационное оборудование // Правила оборудования морских судов Российского морского регистра судоходства. — Часть V. — Санкт-Петербург, 2022.
5. Son P. -W. eLoran: Resilient Positioning, Navigation, and Timing Infrastructure in Maritime Areas / P. -W. Son, S. G. Park, Y. Han [et al.] // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 193708–193716.
6. Son P. -W. Demonstration of the Feasibility of the Korean eLoran System as a Resilient PNT in a Testbed / P. -W. Son [et al.] // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15. — № 3586.
7. Bransby M. MarRINav – supporting maritime CNI / M. Bransby, A. Grant, P. Williams [et al.]. — Institute of Navigation (ION), 2020.
8. IEEE Guide on the Prediction, Measurement, and Analysis of AM Broadcast Reradiation by Power Lines. — Intro. 1996-05-15. — New-York : IEEE, 1996. — 36 p.
9. Tang B. Protecting distance calculation of reradiation interference on AM broadcasting station from UHVDC power line / B. Tang, B. Chen, Z. H. Qu [et al.]. — Beijing : IEEE, 2013. — P. 355–358.
10. Huang L. Study on Improved CG Algorithm for Reradiation Interference Calculation of Transmission Steel Tower / L. Huang, B. Tang, X. Liu [et al.] // IEEE Access. — 2022. — № 10. — P. 69216–69222.
11. Zong S. Research on Electromagnetic Scattering Characteristics of Transmission Tower With Different Tower Types in Short Wave Band Based on the Characteristic Mode Theory / S. Zong, C. Jiao, Z. Zhang [et al.] // IEEE Access. — 2022. — № 11. — P. 77429–77440.
12. Gan Z. Research on Resonant Frequency of Reradiation Interference from Power Transmission Lines at 1.7MHz–3MHz Based on Characteristic Modes / Z. Gan, F. Wang, B. Tang et al. — Beijing, China : IEEE, 2022. — P. 696–699.
13. Liodakis G.S. Effect of Buildings on the Radiation Characteristics of MF Broadcast Antennas / G.S. Liodakis [et al.] // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Wu Z. Spoofing and Anti-Spoofing Technologies of Global Navigation Satellite System: A Survey / Z. Wu, Y. Zhang, Y. Yang [et al.] // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 165444–165496.
2. Li X. Overview of Jamming Technology for Satellite Navigation / X. Li, L. Chen, Z. Lu [et al.] // Machines. — 2023. — Vol. 11. — № 7.
3. Rados K. Recent Advances on Jamming and Spoofing Detection in GNSS / K. Rados, M. Brkic, D. Begusic // Sensors. — 2024. — Vol. 24. — № 13. — P. 4210–4218.
4. Navigatsionnoe oborudovanie [Navigational Equipment] // Rules for the Equipment of Sea-Going Ships of Russian Maritime Register of Shipping. — Part V. — St. Petersburg, 2022.
5. Son P. -W. eLoran: Resilient Positioning, Navigation, and Timing Infrastructure in Maritime Areas / P. -W. Son, S. G. Park, Y. Han [et al.] // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 193708–193716.

6. Son P. -W. Demonstration of the Feasibility of the Korean eLoran System as a Resilient PNT in a Testbed / P. -W. Son [et al.] // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15. — № 3586.
7. Bransby M. MarRINav – supporting maritime CNI / M. Bransby, A. Grant, P. Williams [et al.]. — Institute of Navigation (ION), 2020.
8. IEEE Guide on the Prediction, Measurement, and Analysis of AM Broadcast Reradiation by Power Lines. — Introd. 1996-05-15. — New-York : IEEE, 1996. — 36 p.
9. Tang B. Protecting distance calculation of reradiation interference on AM broadcasting station from UHVDC power line / B. Tang, B. Chen, Z. H. Qu [et al.]. — Beijing : IEEE, 2013. — P. 355–358.
10. Huang L. Study on Improved CG Algorithm for Reradiation Interference Calculation of Transmission Steel Tower / L. Huang, B. Tang, X. Liu [et al.] // IEEE Access. — 2022. — № 10. — P. 69216–69222.
11. Zong S. Research on Electromagnetic Scattering Characteristics of Transmission Tower With Different Tower Types in Short Wave Band Based on the Characteristic Mode Theory / S. Zong, C. Jiao, Z. Zhang [et al.] // IEEE Access. — 2022. — № 11. — P. 77429–77440.
12. Gan Z. Research on Resonant Frequency of Reradiation Interference from Power Transmission Lines at 1.7MHz–3MHz Based on Characteristic Modes / Z. Gan, F. Wang, B. Tang et al. — Beijing, China : IEEE, 2022. — P. 696–699.
13. Liodakis G.S. Effect of Buildings on the Radiation Characteristics of MF Broadcast Antennas / G.S. Liodakis [et al.] // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12.