

Расчет поправок за распространение радиоволн для наземных радионавигационных систем среднего диапазона волн

В. С. Панько¹, А. Г. Андреев¹, А. А. Сенченко¹, А. А. Ерохин¹,
К. В. Князева¹, С. Б. Нелипа², А. В. Косолапов²

¹ Сибирский федеральный университет

² АО «НПП «Радиосвязь», г. Красноярск

vpanko@sfu-kras.ru, aerokhin@sfu-kras.ru

Аннотация. Описывается программный комплекс, предназначенный для расчета частотных характеристик канала распространения широкополосного сигнала радионавигационной системы средних волн. Учитываются характеристики приемной, передающей антенн и влияние многослойной неоднородной поверхности земли на пути распространения сигнала. Результатом являются поправки к определению кодовой и фазовой псевдодальностей. Выполнен расчет множителя ослабления для трехкусовой трассы «море-суша-море» и аналогичной трассы, покрытой льдом. Показано, что наличие льда существенно увеличивает фазу множителя ослабления. При этом полученные частотные характеристики мало изменяются в диапазоне рабочих частот.

Ключевые слова: наземная радионавигационная система; средние волны; распространение радиоволн; псевдодальность

I. ВВЕДЕНИЕ

Радионавигационные системы (РНС) диапазона средних волн (СВ) широко применяются в морской навигации [1], и на фоне низкой помехоустойчивости спутниковых РНС, их использование становится обязательным [2]. Требования к точности определения координат в таких РНС составляют 5–10 м.

Точность работы РНС в существенной степени зависит от равномерности частотной характеристики (ЧХ) радиоканала, по которому распространяется навигационный сигнал. Как показывают исследования, на ЧХ радиоканала может оказывать влияние большое количество факторов: ЧХ приемной и передающей антенн с учетом согласующих цепей [3]; присутствие предметов, окружающих передающую антенну, и вызывающих переотражения [4]; форма и размеры судна, несущего приемную антенну [5]; метеопараметры [6] и другое.

Кроме этого, амплитуда и фаза навигационного радиосигнала находятся в существенной зависимости от среды распространения радиоволн. Для РНС диапазона СВ распространение навигационного сигнала происходит преимущественно земной волной, и достижение заданной точности невозможно без учета влияния земли вдоль пути распространения. Присутствие земной поверхности вызывает дополнительную задержку навигационного сигнала, что приводит к ошибке определения координат. Особенно

важно учитывать поправки за распространение радиоволн над морем, покрытым льдом, при навигации в северных широтах [7], [8].

Современные методы решения проблем распространения электромагнитных волн над земной поверхностью подробно разработаны и представлены в работах [9–11]. Однако в РНС используется навигационный широкополосный сигнал сложной структуры. Само по себе знание амплитуды и фазы электромагнитного поля в рабочем диапазоне частот даже с учетом влияния подстилающей поверхности не дает представления о поправке к определению координат. Необходимо выполнить моделирование прохождения навигационного сигнала через радиоканал с неравномерной ЧХ, результатом чего будет оценка кодовой и фазовой псевдодальности.

II. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТА МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПСЕВДОДАЛЬНОСТЕЙ

В теории распространения радиоволн принято учитывать влияние подстилающей поверхности с помощью комплексного множителя ослабления (МО), обозначаемого далее $V(x)$, где x – расстояние от передающей антенны. Модуль МО $|V(x)|$ дает дополнительное (к сферической волне) ослабление амплитуды поля за счет дифракции вдоль поверхности Земли, а его фаза $\arg(V(x))$ – дополнительное запаздывание относительно фазы той же сферической волны.

Расчет МО для неоднородной сферической трассы в заданном диапазоне частот можно выполнить с помощью численного решения интегральных уравнений Фейнберга и Хаффорда [10]. Для получения сквозной ЧХ радиоканала также необходимо учесть характеристики приемной и передающей антенн РНС.

Для выполнения таких расчетов разработан программный комплекс, обеспечивающий вычисление МО, кодовой и фазовой псевдодальностей и энергетического бюджета радиоканала.

Структура комплекса показана на рис. 1. Исходные данные для расчета – ЧХ антенн, описание многокусовой радиотрассы над поверхностью многослойной земли, диапазон частот.

Модуль расчета ЧХ радиоканала выполняет расчет амплитудной и фазовой ЧХ радиоканала «передающая антенна – неоднородная радиотрасса над поверхностью Земли – приемная антенна» в требуемом диапазоне

Исследование выполнено в рамках государственного задания СФУ (номер FSRZ-2023-0008).

частот по заданным параметрам радиотрассы, характеристикам антенн и их согласующих цепей. Вычислительный алгоритм расчета МО основан на численном решении уравнения Фейнберга. ЧХ антенн загружаются из внешних файлов формата Touchstone*.s2p. В качестве параметров радиотрассы задаются длины образующих ее участков, каждый из которых может содержать до 5 слоев с различной толщиной, проводимостью и диэлектрической проницаемостью.

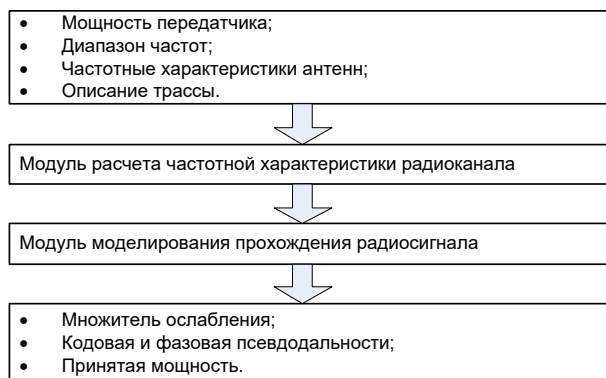


Рис. 1. Структура программного комплекса

Модуль моделирования прохождения радиосигнала через радиоканал состоит из программного имитатора навигационного сигнала, фильтра, имитирующего частотные искажения в радиоканале, и программного приемника, позволяющего оценить ошибки измерения кодовой и фазовой псевдодальностей, возникающие при прохождении сигнала через радиоканал с заданной частотной характеристикой.

Результатом работы комплекса являются вычисленный МО заданной трассы, значения поправок кодовой и фазовой псевдодальностей, мощность сигнала в нагрузке приемной антенны.

Модули комплекса реализованы на языке C++.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для иллюстрации расчета частотных характеристик МО и псевдодальностей была выбрана трехкусочная морская трасса общей длиной 100 км с участком суши (остров) протяженностью 10 км посередине (рис. 2). Электрофизические параметры каждого из участков трассы приведены на рисунке и соответствуют средневлажной земле для суши и морской воде средней солености для морских участков. Длина и структура трассы сопоставима с возможными реальными трассами.

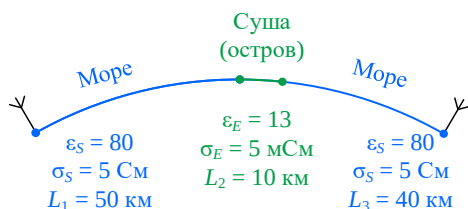


Рис. 2. Модель трехкусочной трассы с островом на море

Особый интерес для обеспечения навигации по Северному морскому пути представляют трассы, частично или полностью покрытые льдом. Для сравнительного анализа были проведены расчеты амплитуды и фазы МО и выполнена оценка псевдодальностей для двух вариантов описанной радиотрассы: открытые морские участки и покрытые

слоем льда толщиной 2 м с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_l = 4$ и проводимостью $\sigma_l = 0.11$ мСм/м.

На рис. 3, 4 показаны амплитуда и фаза МО, полученные на протяжении морской трассы и трассы со льдом на частотах 1, 2 и 3 МГц. Наличие ледяного покрова приводит к существенному (в десять и более раз) увеличению фазы МО на тех же расстояниях. Так, на расстоянии 100 км фаза МО морской трассы на частоте 2 МГц составляет 46° , тогда как для трассы со льдом более 570° .

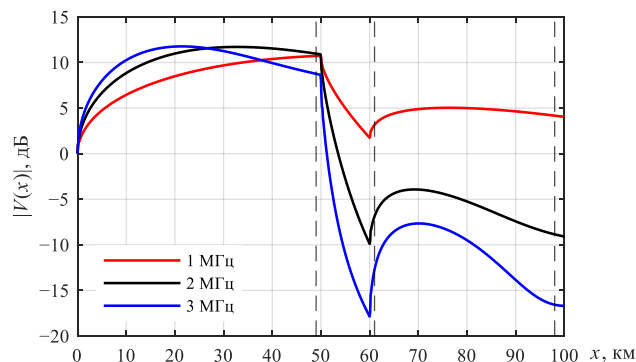
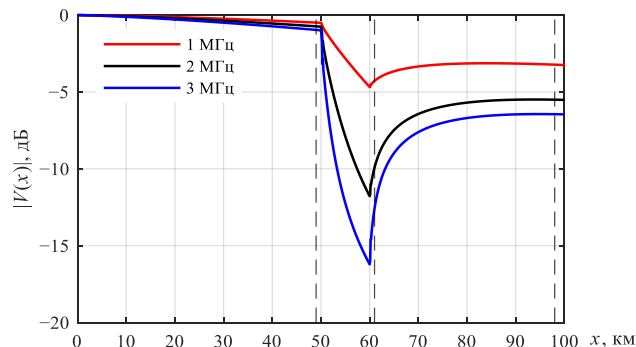


Рис. 3. Модуль МО морской трассы (вверху) и трассы со льдом (внизу) в зависимости от расстояния для трех частот

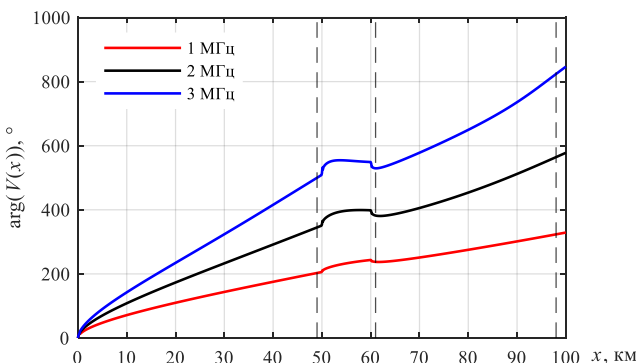
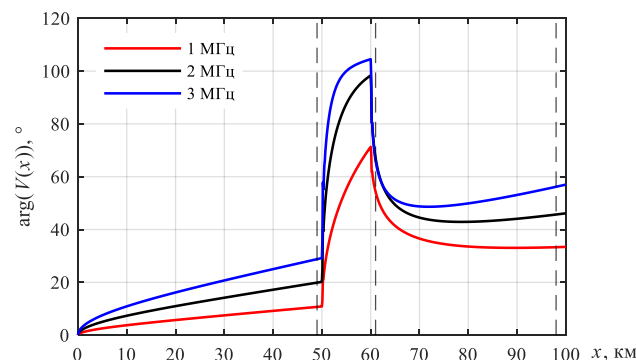


Рис. 4. Фаза МО морской трассы (вверху) и трассы со льдом (внизу) в зависимости от расстояния для трех частот

Для анализа частотных характеристик МО на трассе выбраны три точки, отмеченные маркерами, расположенные на следующих расстояниях от ее начала: 49 км – перед островом на расстоянии 1 км; 61 км – после острова на расстоянии 1 км; 98 км – после острова на большом расстоянии (38 км) от него.

Соответствующие частотные характеристики модуля и фазы МО показаны на рис. 5 и 6. Неравномерность частотных характеристик заметно больше для трассы с ледовым покровом в сравнении с трассой без льда.

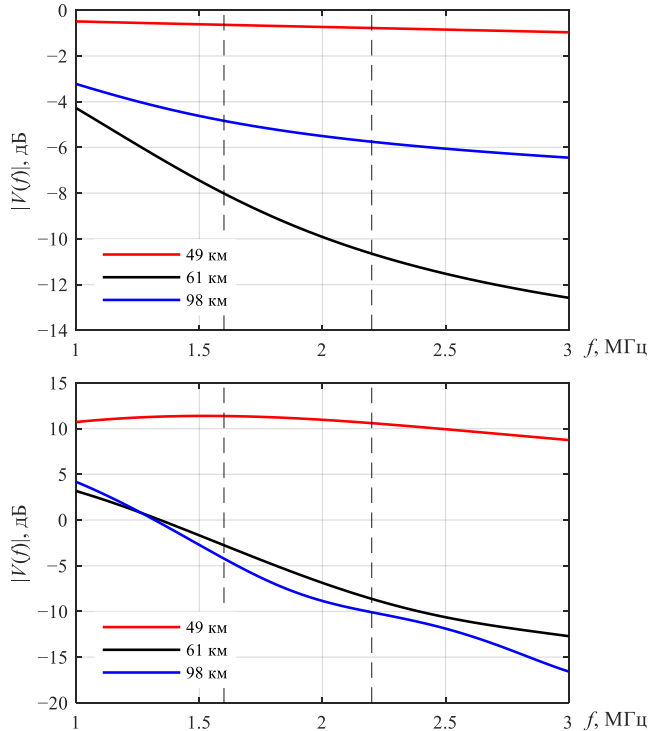


Рис. 5. Модуль МО морской трассы (вверху) и трассы со льдом (внизу) в зависимости от частоты для трех расстояний

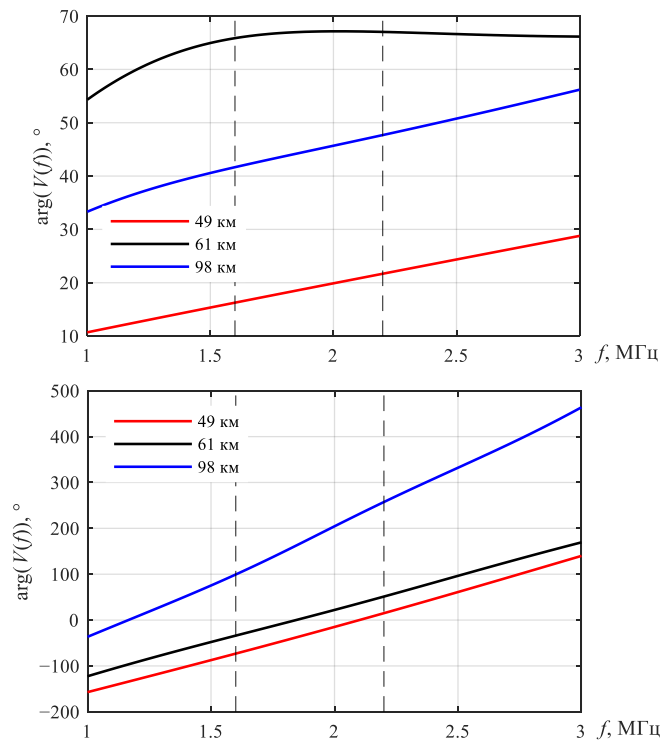


Рис. 6. Фаза МО морской трассы (вверху) и трассы со льдом (внизу) в зависимости от частоты для трех расстояний

Оценки кодовой и фазовой псевдодальностей, определенные по найденным ЧХ МО, приведены на рис. 7 и 8.

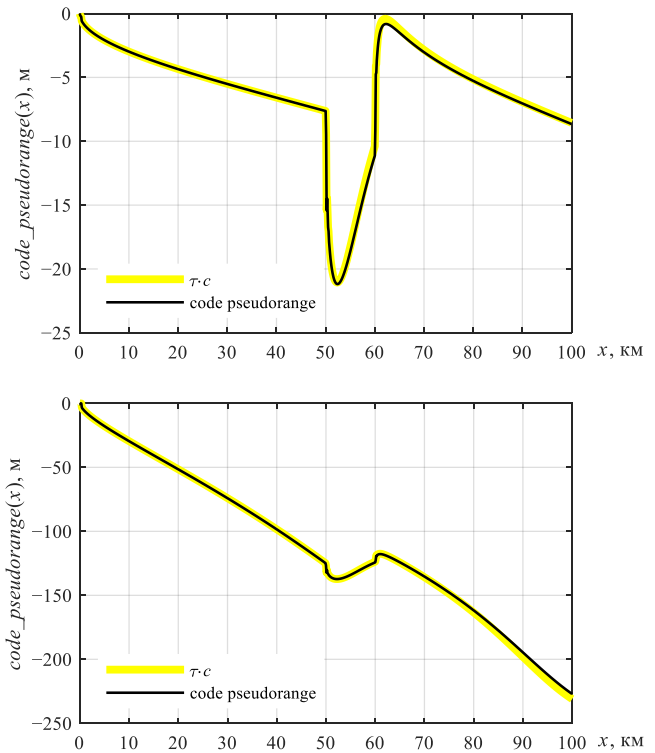


Рис. 7. Ошибка кодовой псевдодальности для морской трассы (слева) и трассы со льдом (справа) в зависимости от расстояния

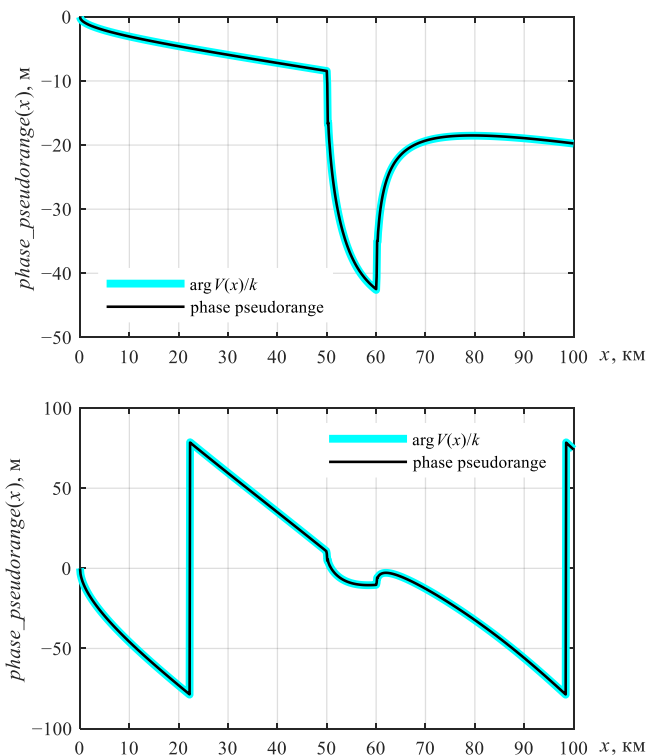


Рис. 8. Ошибка фазовой псевдодальности для морской трассы (слева) и трассы со льдом (справа) в зависимости от расстояния

Совместно с псевдодальностями на рисунках построены зависимости дополнительного набега радиосигнала на частоте 1.9 МГц. Дополнительный набег, выраженный в единицах расстояния, для кодовой псевдодальности определяется умножением группового

времени запаздывания (ГВЗ) сигнала на центральной частоте на скорость распространения в свободном пространстве: $\tau \cdot c$, а для фазовой псевдодальности – делением фазы МО на волновое число: $\arg(V(x)) / k$.

Из рисунков следует, что для трасс, как покрытых льдом, так и без его присутствия, частотная зависимость МО невелика. Для определения поправки к фазовой псевдодальности можно использовать фазу МО на центральной частоте. Для поправки кодовой псевдодальности может быть использована величина ГВЗ, определенная по фазе МО также на центральной частоте. Следует учитывать, что приведенные результаты основаны только на влиянии неравномерности ЧХ МО. Если принимать во внимание также и неравномерности ЧХ антенн, то картина будет существенно отличаться. В этом случае для определения поправок псевдодальностей необходимо проводить полное моделирование прохождения сигнала через радиоканал.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программный комплекс, основанный на численном решении уравнения Фейнберга позволяет оценивать радиотрассы над гладкой земной поверхностью с произвольным распределением электрофизических параметров подстилающей поверхности в заданном диапазоне частот, и получать оценки поправок к кодовой и фазовой псевдодальностям. Результаты расчетов показывают, что присутствие льда на морских участках резко увеличивает фазу множителя ослабления трассы по сравнению с открытой морской поверхностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Куликовский И.В., Адамович О.Р., Бербенев Д.В. Направления совершенствования системы навигационно-гидрографического обеспечения Военно-Морского Флота // Военная мысль. 2023. № 12. С. 50-58.
- [2] Навигационное оборудование // Правила оборудования морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть V. Санкт-Петербург, 2022.
- [3] V.S. Panko et al., "The Influence of Reradiation on the Phase Pattern of a Medium Wave Radio Navigation System Antenna," 2024 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 52-54, doi: 10.1109/ADMInC63617.2024.10775551.
- [4] V.S. Panko, A.A. Erokhin, K.V. Knyazeva and A.G. Andreev, "Medium Wave Terrestrial Radio Navigation Systems Antenna Radiation Pattern Distortions Due to Multipath Propagation," 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496762.
- [5] Искажения фазовой диаграммы направленности антенны СВ-диапазона при ее размещении на носителе / К.В. Князева, В.С. Панько, А.А. Ерохин, А.Г. Андреев, А.В. Косолапов, С.Б. Нелипа // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 7. doi: 10.30898/1684-1719.2024.7.6.
- [6] Y. Pu, R. Sun, Y. Zhao, X. Zheng, J. He and X. Xi, "Modified Integral Equation Method With Time-Varying Factors for Low-Frequency Ground-Wave Propagation Delay Prediction," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 21, no. 7, pp. 1303-1307, July 2022, doi: 10.1109/LAWP.2022.3164249.
- [7] Y.B. Bashkuev and M.G. Dembelov, "Surface electromagnetic wave in the range of 100–5000 kHz over sea covered by ice (numerical results)," 2016 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), Lviv, Ukraine, 2016, pp. 322-325, doi: 10.1109/MMET.2016.7544056.
- [8] Q.-Z. Lu, D.-D. Wang, C. Han, P. -R. Bai, R.-M. Jin and M. Ou, "An Investigation of LF Groundwave Propagation Characteristics Over Sea Covered by Ice Using the Parabolic Equation Method," 2023 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China), Hangzhou, China, 2023, pp. 1-3, doi: 10.23919/ACES-China60289.2023.10249539.
- [9] Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Советское радио, 2011. 520 с.
- [10] Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука. Физматлит, 1999. 496 с.
- [11] Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. М.: Наука, 1991. 196 с.