

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.13>

УДК: 621.396.673

ВЛИЯНИЕ АНТЕННЫХ СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ПРИ МНОГОЛУЧЕВОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ СИГНАЛОВ

**В.С. Панько ¹, А.А. Ерохин ¹, А.Г. Андреев ¹, Ю.П. Саломатов ¹,
А.В. Косолапов ², С.Б. Нелипа ²**

**¹ Сибирский федеральный университет
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28**

**² Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»
660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, 19**

Статья поступила в редакцию 18 июня 2025 г.

Аннотация. Объекты, находящиеся в непосредственной близости от передающей антенны наземной радионавигационной системы, т.е. находящиеся в ее ближней зоне, могут вызывать значительные искажения как в амплитудной, так и фазовой диаграммах направленности в дальней зоне. Кроме того, данные искажения имеют частотно зависимый характер. Таким образом, использование средневолнового диапазона длин волн для радионавигации сопряжено с искажением частотной характеристики радиоканала. Помимо этого, для согласования антенны опорной станции на нагрузку 50 Ом могут применяться согласующие цепи, которые также будут вносить частотные искажения в характеристику радиоканала. Частотная характеристика радиоканала с искажениями, в конечном итоге, повлияет на оценку радионавигационных параметров, таких как кодовая и фазовая псевдодальности за счет частотной зависимости амплитуды и фазы принимаемого сигнала. Так, задачей работы

является исследование влияния согласующих цепей на оценку радионавигационных параметров.

Ключевые слова: СВ-диапазон, локальная радионавигационная система, радионавигация, согласующая цепь, многолучевое распространение сигналов.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-29-20180 <https://rscf.ru/project/25-29-20180/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Автор для переписки: Ерохин Алексей Александрович, aerokhin@sfu-kras.ru

Введение

Несмотря на повсеместное использование глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), наземные радионавигационные системы (РНС) диапазона средних волн продолжают широко использоваться в морской радионавигации [1]. Это связано, в первую очередь, с низкой помехозащищенностью ГНСС [2].

Для точного определения координат потребителей, находящихся в разных направлениях относительно опорных станций (ОС) РНС, фазовая диаграмма направленности (ФДН) антенн ОС должна иметь форму идеальной сферы (окружности в азимутальной плоскости), и фазовый центр антенны должен совпадать с ее физическим центром. При практическом применении РНС часто оказывается [3], что вокруг антенны ОС имеются близлежащие проводящие объекты, которые переизлучают сигнал РНС. Эти вторичные излучатели вносят искажения в ФДН основной антенны, зависящие от направления распространения радиоволн. В роли вторичных излучателей могут выступать линии электропередачи [4], [5], высотные здания [6], башенные краны, мачты [7] и другие объекты [8].

1. Антенная система с согласующей цепью. Математическая модель

В качестве оценки степени искажения ФДН может быть использовано значение ее неравномерности в азимутальной плоскости, которое выражается следующим образом:

$$\Delta\psi = \max(\psi(\varphi)) - \min(\psi(\varphi)),$$

где $\psi(\varphi)$ – ФДН в азимутальной плоскости, $\varphi = 0 \dots 360^\circ$. Для амплитудной ДН (АДН), выраженной в децибелах, аналогично можно записать

$$\Delta F = \max(f(\varphi)) - \min(f(\varphi)).$$

В [9], [10] и [11] было показано, какое влияние на неравномерность АДН и ФДН оказывают вторичные излучатели различной формы, а также, как меняется при этом оценка кодовой и фазовой псевдодальностей. Установлено, что наличие проводящих конструкций высотой 40-80 м приводит к возникновению погрешности измерения кодовой и фазовой псевдодальностей на уровне 10-20 м, а погрешности определения координат потребителей РНС будут существенно выше из-за геометрического фактора.

При моделировании ФДН обычно рассматривается антенна РНС без каких-либо согласующих и трансформирующих устройств на входе. Однако в реальных применениях РНС к передающим антеннам опорных станций (ОС) подключаются согласующие цепи (СЦ) различной конструкции – узкополосные и резистивные. Следует выяснить, окажет ли СЦ какое-либо влияние на полученные оценки искажения ФДН и ошибок псевдодальностей, с учетом воздействия окружающих объектов.

Рассмотрим излучающую систему, состоящую из передающей антенны и вторичного излучающего объекта (рис. 1). Антенна размещена в начале координат и подключена к источнику электромагнитных колебаний без использования каких-либо согласующих или трансформирующих устройств. На расстоянии R в направлении оси Ox от начала координат размещен вторичный излучатель. В направлении угла φ находится приемник навигационного сигнала, обозначенный P .

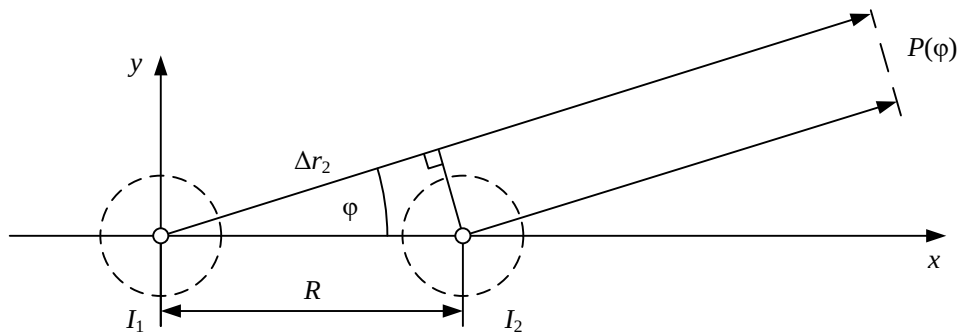


Рис. 1. Излучающая система из антенны и вторичного излучателя.

Будем считать, что антенна и вторичный излучатель имеют всенаправленную ДН в азимутальной плоскости: $F_0(\varphi) = 1$, тогда комплексная характеристика направленности такой системы в дальней зоне описывается следующим выражением:

$$\dot{f}(\varphi) = \dot{I}_1 e^{jk\Delta r_1} + \dot{I}_2 e^{jk\Delta r_2}, \quad (1)$$

где $\dot{I}_1 = I_1 e^{j\psi_1}$ – комплексная амплитуда тока возбуждения антенны, $\dot{I}_2$ – комплексная амплитуда тока, наведенного во вторичном излучателе, Δr_2 – разность хода до точки наблюдения от вторичного излучателя. Модуль характеристики (1) определяет амплитудную, а фаза – фазовую ДН системы. Разность хода для вторичного излучателя:

$$\Delta r_2 = R \cos \varphi.$$

Вторичный излучатель возбуждается падающей на него от основной антенны волной. Пройдя расстояние R , она имеет амплитуду e^{-jkR} / R , т.е, фазовый сдвиг $-kR$ относительно антенны. Амплитуда тока, наведенного во вторичном излучателе, пропорциональна амплитуде падающей волны с некоторым коэффициентом $\dot{s}$. Это комплексная величина, значение которой зависит от расположения, размеров и параметров вторичного излучателя:

$$\dot{I}_2 = \dot{s} \dot{I}_1 \frac{e^{-jkR}}{R}.$$

В общем случае $\dot{s}$ зависит также от частоты, но в дальнейшем рассмотрении для упрощения будем считать, что такой зависимости нет. С учетом сказанного, выражение (1) принимает вид

$$\dot{f}(\varphi) = \dot{I}_1 \left[1 + \frac{\dot{S}}{R} e^{-jk(R+R\cos\varphi)} \right]. \quad (2)$$

Часть выражения в квадратных скобках зависит от переменных φ , R и $\dot{S}$, т.е., от взаимного положения и размеров антенны и вторичного излучателя, и не зависит от амплитуды и фазы тока возбуждения $\dot{I}_1$. При использовании СЦ в приведенном выражении будет меняться только значение $\dot{I}_1$, т.к. СЦ изменяет амплитуду и фазу возбуждения антенны. Пространственная форма характеристики направленности определяется выражением в квадратных скобках и от наличия и типа СЦ не зависит.

Пусть теперь ко входу антенны подключена некоторая СЦ. В этом случае ток возбуждения антенны принимает значение $\dot{I}_M = I_M e^{j\psi_M}$, которое отличается по амплитуде и фазе от значения тока $\dot{I}_1$ без СЦ, и выражение для характеристики направленности (2) превращается в

$$\dot{f}_M(\varphi) = \dot{I}_M \left[1 + \frac{\dot{S}}{R} e^{-jk(R+R\cos\varphi)} \right]. \quad (3)$$

Сравнивая (2) и (3), легко убедиться, что характеристика направленности системы с СЦ может быть получена из такой же характеристики без СЦ путем умножения на комплексный масштабный множитель $\dot{I}_M / \dot{I}_1$:

$$\dot{f}_M(\varphi) = \frac{\dot{I}_M}{\dot{I}_1} \dot{f}(\varphi) = \frac{I_M}{I_1} \dot{f}(\varphi) e^{j(\psi_M - \psi_1)}. \quad (4)$$

То есть, амплитудная ДН изменится на постоянный коэффициент I_M / I_1 , а фазовая ДН получит постоянный фазовый сдвиг $\psi_M - \psi_1$. Зависимость ДН от угла φ при этом не изменится, также останутся неизменными и значения азимутальной неравномерности ДН.

С помощью нормирования можно привести выражения для характеристик направленности к одинаковому виду. Нормирование выполняется путем деления характеристики направленности на ее комплексное значение в направлении $\varphi_{\max}$, соответствующем максимуму излучения:

$$\dot{F}(\varphi) = \frac{\dot{f}(\varphi)}{\dot{f}(\varphi_{\max})}. \quad (5)$$

Аналогично для системы с СЦ:

$$\dot{F}_M(\varphi) = \frac{\dot{f}_M(\varphi)}{\dot{f}_M(\varphi_{\max})}. \quad (6)$$

С учетом (4) получим

$$\dot{F}_M(\varphi) = \frac{\frac{\dot{I}_M}{\dot{I}} \dot{f}(\varphi)}{\frac{\dot{I}_M}{\dot{I}} \dot{f}(\varphi_{\max})} = \frac{\dot{f}(\varphi)}{\dot{f}(\varphi_{\max})},$$

т.е., нормированные характеристики направленности системы без СЦ и системы с СЦ совпадают. Из этого следует, что значения неравномерностей АДН и ФДН не зависят от наличия СЦ.

2. Антенная система с согласующей цепью. Электродинамическая модель

Для иллюстрации полученных результатов с помощью САПР проведем электродинамическое моделирование передающей антенны в присутствии вторичного излучателя (рис. 2).

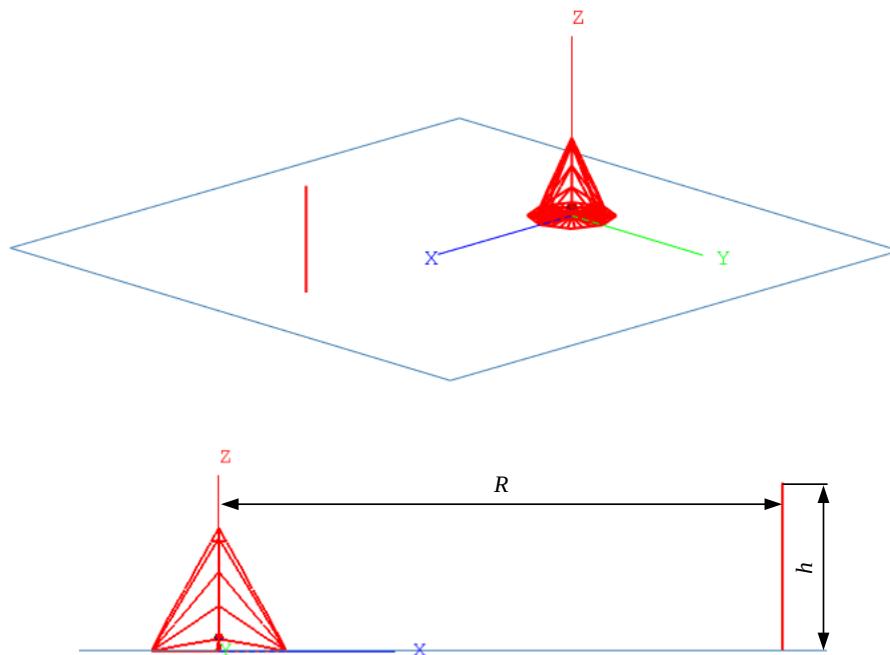


Рис. 2. Передающая антенна в присутствии вторичного излучателя.

Модель антенны представляет собой несимметричный монополь высотой 22 м с верхней емкостной нагрузкой, снабженный системой растяжек и приземных противовесов. Монополь размещен на подстилающей поверхности, имеющей параметры «средней земли» с проводимостью $\sigma = 0.005$ См/м и относительной проницаемостью $\varepsilon = 13$. Вторичным излучателем является вертикальный проводник высотой $h = 80$ м, расположенный на расстоянии R от антенны, нижний конец проводника касается подстилающей поверхности. При таких условиях на частоте 1.9 МГц антенна с учетом влияния вторичного излучателя имеет входное сопротивление $17 - j135$ Ом. Это приводит к необходимости использования согласующих цепей при подключении антенны к фидеру сопротивлением 50 Ом.

Для описанной модели с помощью САПР по методу моментов поочередно вычислены характеристики направленности системы без СЦ (далее на рисунках обозначаются индексом WO), при подключении узкополосной СЦ (NB), и резистивной СЦ с индуктивностью (RL). Схемы СЦ приведены на рис. 3. Также может быть использована широкополосная согласующая цепь, однако в рабочей полосе частот РНС для данной конструкции антенны она не сможет обеспечить требуемый уровень согласования и далее рассматриваться не будет.

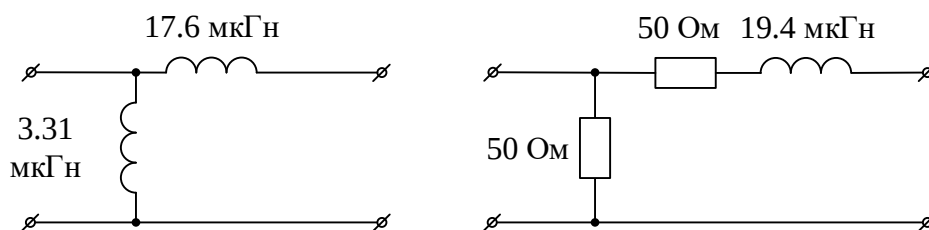
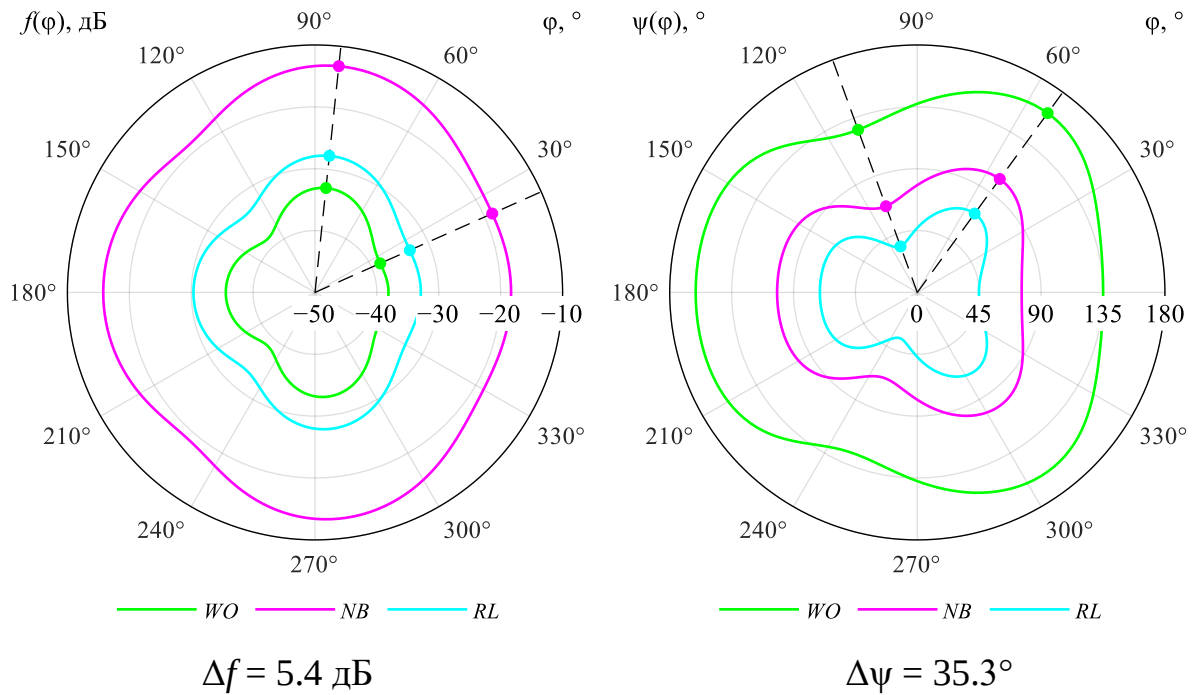
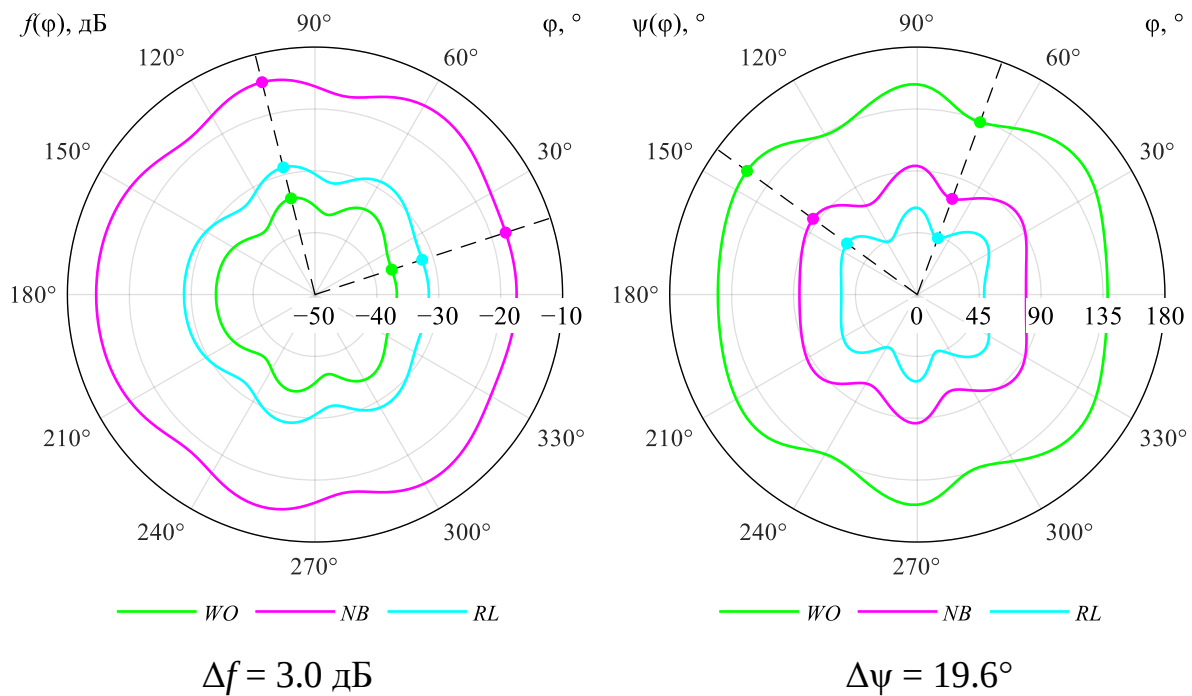


Рис. 3. Схемы согласующих цепей: узкополосная (NB , слева) и резистивная с индуктивностью (RL , справа).

На рис. 4 и 5 показаны азимутальные АДН и ФДН, полученные путем моделирования при вышеописанных условиях на частоте 1.9 МГц. Маркерами указаны направления максимумов и минимумов, а также приведены значения неравномерностей АДН и ФДН. Как видно, формы ДН и направления максимумов и минимумов совпадают.

Рис. 4. Амплитудная (слева) и фазовая (справа) ДН для разных СЦ, $R = 100$ м.Рис. 5. Амплитудная (слева) и фазовая (справа) ДН для разных СЦ, $R = 200$ м.

Нужно отметить, однако, что, несмотря на совпадение пространственных форм ДН для разных СЦ, частотная характеристика радиоканала при использовании различных СЦ изменится. Напряженность поля, создаваемого передающей антенной с подключенной СЦ в дальней зоне в направлении φ на расстоянии r , составляет

$$\dot{E}(\varphi, r) = \frac{Z_0}{2\lambda} \dot{I}_M h_d \dot{F}(\varphi) \frac{e^{-jkr}}{r},$$

где Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства, h_d – действующая длина антенны. Величина $\dot{I}_M$, входящая в это выражение, зависит от частоты и типа СЦ, а это значит, что амплитуда и фаза поля в определенной точке (φ, r) , которые и определяют частотную характеристику радиоканала между передающей антенной и приемником, тоже будут зависеть от частоты. Поэтому для оценки псевдодальностей моделирование излучающей системы из антенны и вторичного излучателя необходимо выполнять с учетом СЦ, подключенной ко входу антенны. На рис. 6 показаны значения амплитуды и фазы сигнала в направлении $\varphi = 180^\circ$ в зависимости от частоты для различных СЦ при расстоянии между антенной и вторичным излучателем $R = 100$ м.

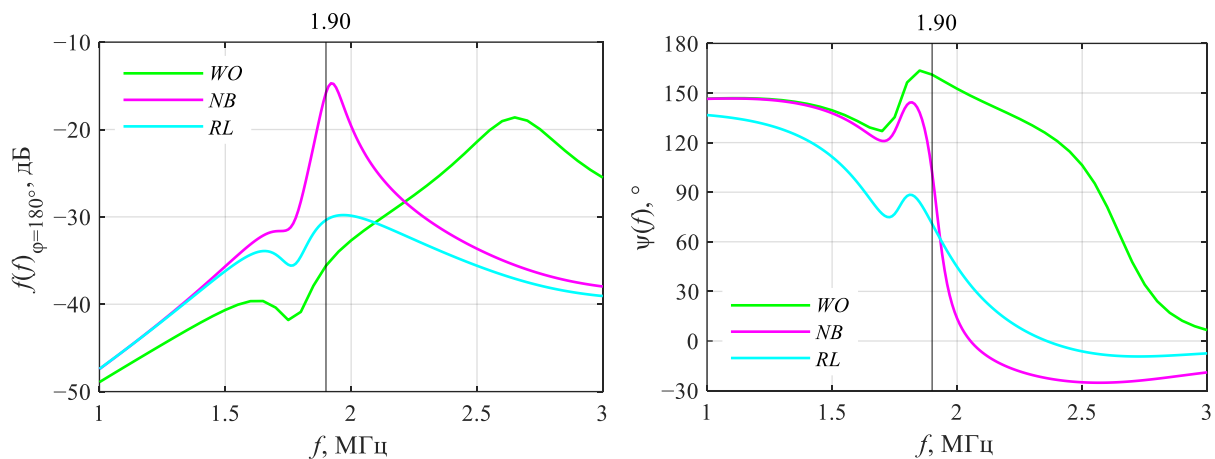


Рис. 6. Амплитуда (слева) и фаза (справа) сигнала в зависимости от частоты, для разных СЦ, $R = 100$ м, $\varphi = 180^\circ$.

Неравномерность полученных частотных характеристик приводит к появлению ошибок определения псевдодальностей по сравнению с идеальным радиоканалом, в котором частотные искажения радионавигационного сигнала отсутствуют. При этом неравномерность вызвана как наличием СЦ, так и присутствием вторичного излучателя.

На основе полученных частотных характеристик получены оценки ошибок псевдодальностей, определенные по следующей методике. Частотная характеристика канала получена моделированием передающей антенны с различными СЦ, в присутствии вертикального проводника, расположенного на

различных расстояниях от антенны. Для моделирования прохождения сигнала через радиоканал синтезируются цифровые нерекурсивные фильтры, имитирующие искажения навигационного сигнала в радиоканале. Далее, с использованием программного имитатора, программного приемника радионавигационной системы и синтезированных цифровых фильтров, выполняется моделирование прохождения сигнала через радиоканал.

На рис. 7 показаны ошибки измерения кодовой и фазовой псевдодальности относительно случая отсутствия отражающих предметов, в зависимости от расстояния между антенной и вторичным излучателем высотой 80 м, вычисленные в направлении азимута 0° , а на рис. 8 – для азимута 180° .

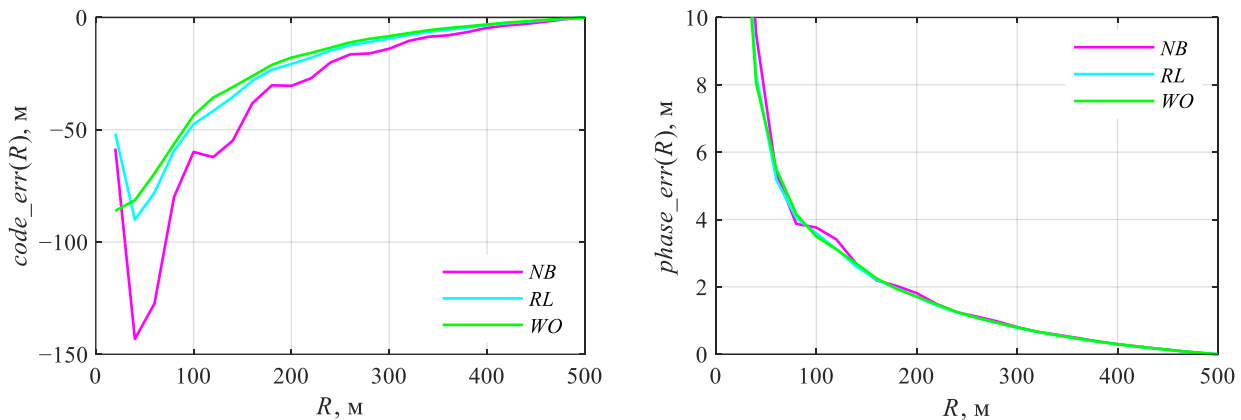


Рис. 7. Ошибки измерения кодовой и фазовой псевдодальностей в зависимости от расстояния для разных СЦ, $\varphi = 0^\circ$.

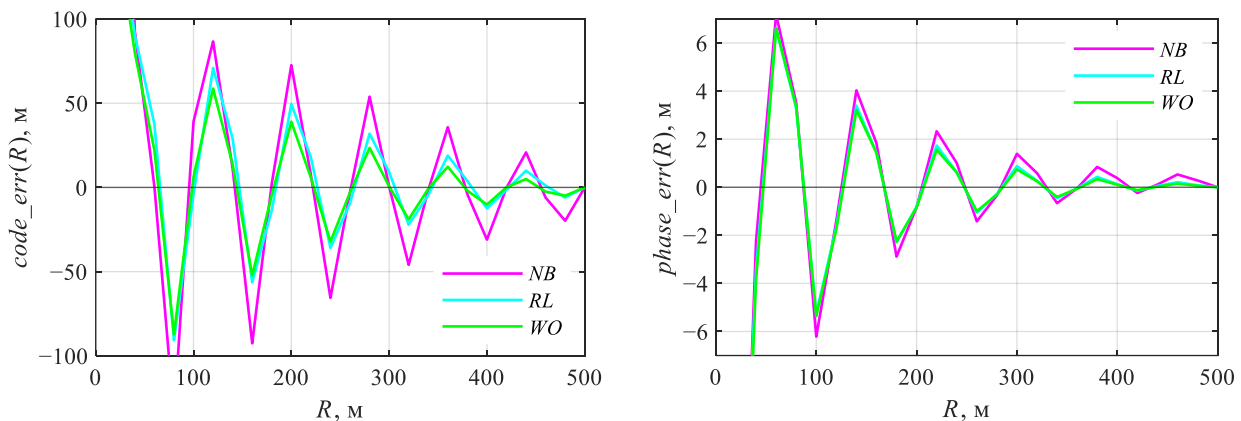


Рис. 8. Ошибки измерения кодовой и фазовой псевдодальностей в зависимости от расстояния для разных СЦ, $\varphi = 180^\circ$.

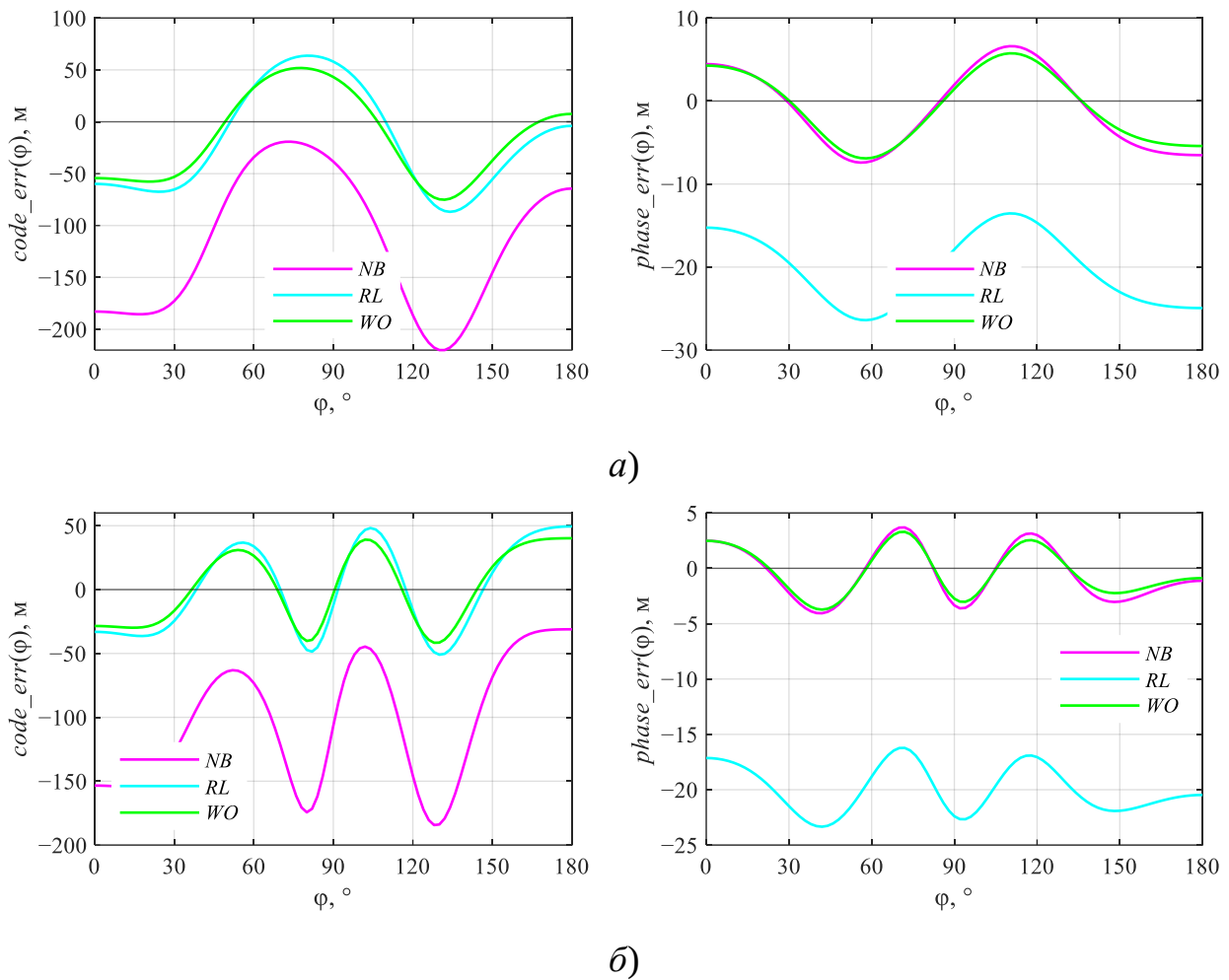


Рис. 9. Ошибки измерения кодовой и фазовой псевдодальностей в зависимости от азимута для разных СЦ: а) $R = 100$ м, б) $R = 200$ м.

С целью определения минимально необходимого удаления вторичного излучателя от антенны, при котором ошибка измерения псевдодальности не превышает заданного порога, были проведены следующие расчеты. Для каждого расстояния до вторичного излучателя получены зависимости псевдодальностей от азимута, выбраны максимальное и минимальное значения псевдодальностей и вычислена разность между ними. Полученная разность является максимально возможным значением ошибки для выбранного расстояния. Ее значение в зависимости от расстояния между антенной и вторичным излучателем показаны на рис. 10.

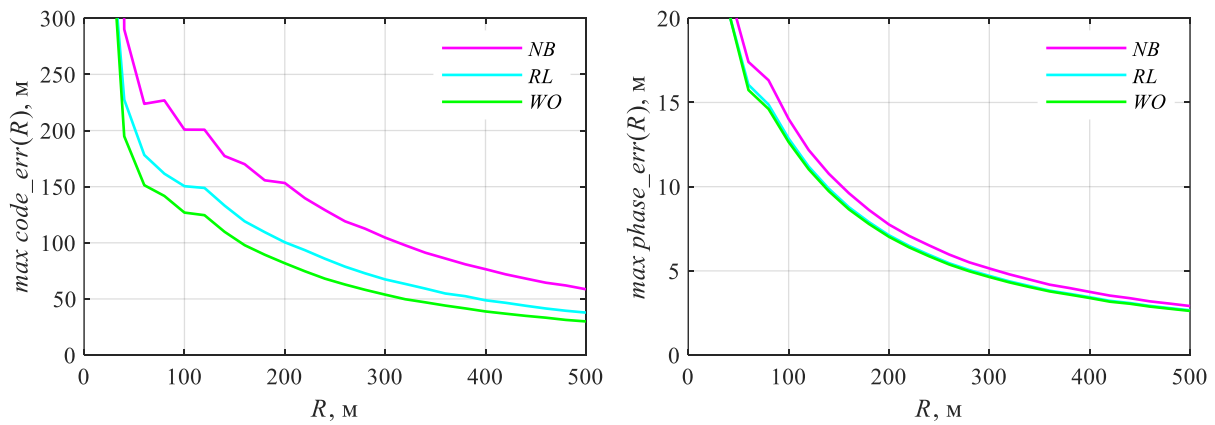


Рис. 10. Максимальная ошибка измерения кодовой и фазовой псевдодальности при изменении азимута, в зависимости от расстояния для разных СЦ.

Из приведенных рис. 7 и 8 хорошо заметен разный характер изменения и величина ошибок псевдодальностей в противоположных направлениях 0° и 180° . Для объяснения этого факта далее положим, что антенна возбуждается единичной амплитудой тока $\dot{I}_1 = 1$ и рассмотрим значения ФДН в различных направлениях φ . Положительному направлению оси Ox , т.е., от антенны в сторону отражателя, соответствует угол $\varphi = 0^\circ$, при этом $\cos \varphi = 1$ и (2) можно записать в виде

$$\dot{f}_{\varphi=0} = 1 + \frac{\dot{s}}{R}.$$

Как видно из этого выражения, фаза характеристики $\dot{f}_{\varphi=0}$, т.е., значение ФДН, в этом направлении зависит только от $\dot{s}$, и не зависит от частоты. Также не зависит от частоты и амплитуда характеристики. Другая ситуация возникает при излучении в отрицательном направлении оси Ox , т.е., от антенны противоположно вторичному излучателю: при этом $\varphi = 180^\circ$, $\cos \varphi = -1$ и (3) запишется в виде

$$\dot{f}_{\varphi=\pi} = 1 + \frac{\dot{s}}{R} e^{-jk2R}.$$

В этом случае фаза зависит от расстояния R и волнового числа k , т.е., от частоты сигнала. Отсюда следует важный вывод, определяющий влияние вторичных излучателей, расположенных вблизи передающей антенны, на ФЧХ радиоканала между антенной и приемником навигационного сигнала. Поскольку

влияние на ЧХ радиоканала определяется разностью хода прямого и отраженных сигналов, то наличие вторичного излучателя «спереди» антенны ОС (между антенной ОС и антенной корабельной станции) будет влиять на ЧХ радиоканала в меньшей степени, чем в случае вторичного излучателя, находящегося «сзади» антенны ОС.

Более наглядно полученный результат можно пояснить с помощью рис. 11. Передающая антенна располагается в начале координат. На расстоянии R от нее находится вторичный излучатель (вертикальная мачта). К приемной антенне корабельной станции будут приходить две волны: прямая от передающей антенны (индекс 1) и вторичная от мачты (индекс 2).

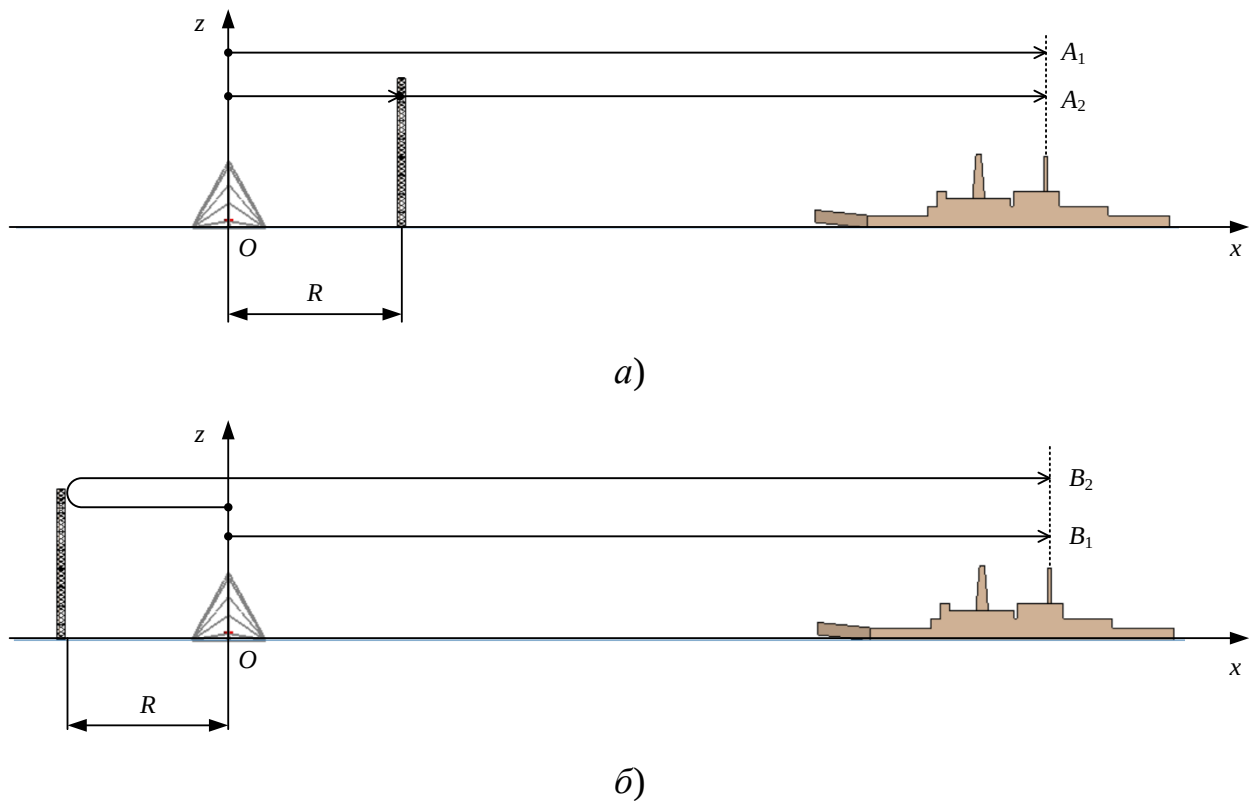


Рис. 11. Расположение передающей антенны, приемника и вторичного излучателя: а) вторичный излучатель перед антенной; б) позади антенны.

Если вторичный излучатель находится перед передающей антенной по отношению к корабельной станции (рис. 11а, $\varphi = 0$ по схеме на рис. 1), до антенны корабельной станции волны A_1 и A_2 пройдут одинаковое расстояние, и при изменении частоты сигнала их фазы будут меняться синхронно. В результате форма суммарного сигнала в точке приема не будет изменяться в

зависимости от частоты. Если вторичный излучатель расположен сзади передающей антенны (рис. 11б, $\varphi = 180^\circ$ по схеме на рис. 1), то вторичная волна B_2 пройдет до точки приема расстояние, на $2R$ большее, чем прямая волна B_1 , и при этом получит дополнительный фазовый сдвиг $k \cdot 2R$, зависящий от длины волны. Фазы волн при изменении частоты сигнала будут меняться несинхронно, что приведет к изменению формы широкополосного сигнала в точке приема.

Небольшие отличия на графиках ошибок измерения псевдодальностей, наблюдаемые при использовании различных СЦ, также могут быть объяснены тем, что СЦ совместно с антенной вносит частотные искажения в навигационный сигнал, а значит и меняет форму автокорреляционной функции сигнала. Форма корреляционной функции, в свою очередь, определяет вид огибающей ошибки многолучевости.

Заключение

Основным выводом проведенного исследования является то, что СЦ не решает проблемы многолучевости, но и не усугубляет ее. Многообразие всевозможных отражающих предметов, особенности их взаимного расположения относительно антенн ОС и потребителей навигационной системы, нюансов самих предметов (наличие/отсутствие заземления или электрического контакта между отдельными частями конструкций) не позволяет дать универсальных, и, в тоже время практически выполнимых рекомендации по выбору места для размещения ОС.

Полагаться только на калибровочные данные, которые могут быть получены для каждой ОС путем измерения в ходе оплавания/облета, не следует, поскольку при изменении погоды меняются свойства подстилающей поверхности в месте установки антенны. Это приводит к изменению ФДН антенны и увеличению остаточной погрешности после использования калибровочных данных.

Таким образом, при выборе точек установки антенн ОС, можно рекомендовать проведение процедуры оценки равномерности ФДН по данным рекогносцировки с потенциальных мест размещения.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-29-20180, <https://rscf.ru/project/25-29-20180/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Литература

1. Радионавигационный план Российской Федерации. Утвержден приказом Минпромторга России от 28 июля 2015 г. № 2123.
2. Wu Z. et al. Spoofing and anti-spoofing technologies of global navigation satellite system: A survey // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 165444-165496. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022294>
3. Агафонников А.М. Фазовые радиогеодезические системы для морских исследований. – Наука, 1979.
4. Gan Z. et al. Research on Resonant Frequency of Reradiation Interference from Power Transmission Lines at 1.7 MHz-3MHz Based on Characteristic Modes // 2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). – IEEE, 2022. – С. 696-699. <https://doi.org/10.1109/SPIES55999.2022.10082355>
5. Zong S. et al. Research on electromagnetic scattering characteristics of transmission tower with different tower types in short wave band based on the characteristic mode theory // IEEE Access. – 2023. – Т. 11. – С. 77429-77440. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3297892>
6. Kavanagh S.J., Balmain K.G. Highrise building reradiation and detuning at MF // IEEE transactions on broadcasting. – 1984. – №. 1. – С. 8-16. <https://doi.org/10.1109/TBC.1984.266511>

7. Huang L. et al. Study on Improved CG Algorithm for Reradiation Interference Calculation of Transmission Steel Tower // IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – С. 69216-69222. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3186982>
8. Koo H., Nam S. Modified L-type eloran transmitting antenna for co-location with an AM antenna // 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – IEEE, 2016. – С. 370-371.
9. Panko V.S. 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). – IEEE, 2024. – С. 52-54. <https://doi.org/10.1109/ADMInC63617.2024.10775551>
10. Panko V.S. et al. 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. – IEEE, 2024. – С. 1-5. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF60226.2024.10496762>
11. Князева К.В., Панько В.С., Ерохин А.А., Андреев А.Г., Косолапов А.В., Нелипа С.Б. Искажения фазовой диаграммы направленности антенны СВ-диапазона при ее размещении на носителе. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.6>

Для цитирования:

Панько В.С., Ерохин А.А., Андреев А.Г., Саломатов Ю.П., Косолапов А.В., Нелипа С.Б. Влияние антенных согласующих цепей на погрешность измерения радионавигационных параметров в системах средневолнового диапазона при многолучевом распространении сигналов // Журнал радиоэлектроники – 2025. – №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.13>