

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.11>

УДК: 621.396.673

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫЕ АНТЕННЫ СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

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

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 10 апреля 2025 г.

Аннотация. Основные требования, предъявляемые к приемным антеннам аппаратуры потребителей наземных радионавигационных систем средневолнового диапазона, состоят в обеспечении равномерности частотных характеристик в рабочей полосе частот навигационной системы, а также в обеспечении приемлемого уровня коэффициента усиления в направлении на горизонт. Тем не менее, данные требования являются противоречивыми. Так, например, увеличение коэффициента усиления антенны требует увеличения ее габаритов. Также известно, что настройка антенны, обеспечивающей резонанс на центральной частоте работы навигационной системы, позволит существенно повысить коэффициент усиления. Однако, это приведет к значительной неравномерности амплитудно- и фазо-частотных характеристик антенны. Таким образом, задачей исследования является нахождение конструкции и параметров антенны, обеспечивающих определенный компромисс при выполнении требований. В качестве ориентировочного значения высоты антенны, приемлемой из практических соображений, в настоящем исследовании использовалась величина 6 м.

Ключевые слова: электрически малая антенна, монополь, свернутый монополь, согласование, групповое время запаздывания, радионавигационная система, средние волны.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке «Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта № 20240924-08494 «Исследование влияния подстилающей поверхности на пути распространения радионавигационного сигнала на точность измерения радионавигационных параметров в наземных радионавигационных системах».

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

Введение

Понятие электрически малой антенны (ЭМА, electrically small antenna, ESA) было введено в работе [1] как антенны, которая может быть заключена в сферу радиуса, по величине обратного волновому числу: $a = \lambda / 2\pi$. Для диапазона частот локальных средневолновых РНС [2] этот радиус составляет 22...29 м. Используемые в существующих РНС антенны обычно имеют высоту не более 22 м на опорных станциях и не более 6 м на корабельных станциях, и, таким образом, относятся к классу электрически малых.

В [3] отмечаются следующие принципиальные сложности, возникающие при разработке ЭМА: ограниченный коэффициент усиления и полоса рабочих частот, существенное влияние фидера и окружающей обстановки, затруднения при измерении характеристик.

ЭМА характеризуются низким сопротивлением излучения и большим реактивным сопротивлением емкостного характера. Известные конструкции антенн в виде перевернутого конуса Monoscone [4] или вибратора с емкостной нагрузкой направлены на увеличение эквивалентной емкости антенны, и таким образом, уменьшение реактивной составляющей входного сопротивления антенны $X = 1 / j\omega C$.

Активная часть входного сопротивления R складывается из сопротивления излучения и сопротивления потерь. Малая величина сопротивления излучения может оказаться сопоставимой с сопротивлением потерь, что приводит к резкому уменьшению КПД. В силу этого ЭМА являются крайне неэффективными излучателями [5], и редко используются как передающие антенны в системах радиосвязи. С другой стороны, их использование в тех же радиосистемах в качестве приемных антенн вполне оправдано, так как эффективность антенны (КПД) в этом случае менее важна по сравнению с соотношением сигнал/шум. Кроме того, ЭМА используются в роли пробников поля при радиоизмерениях, а также в радиопеленгации и радионавигации.

1. Добротность электрически малых антенн и теоретический предел ширины полосы рабочих частот

Для ЭМА добротность обычно определяется по приближительной формуле:

$$Q \approx \frac{\omega}{2R} \frac{dX}{d\omega}. \quad (1)$$

Высокие значения добротности, характерные для ЭМА, означают, что значительная доля энергии запасена в области ближнего поля излучения антенны. Это приводит к высоким значениям тока, протекающего по антенне, большим омическим потерям, и, самое главное, весьма узкому диапазону частот, в пределах которого антенна может быть согласована с фидером.

Для ЭМА существует фундаментальное ограничение, известное как предел Чу, и ограничивающее ширину полосы рабочих частот [6, 7]. Предел Чу устанавливает минимальное значение добротности гипотетической антенны сферической формы, полностью занимающей сферу радиусом a :

$$Q \geq \frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka}. \quad (2)$$

Здесь $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число.

Например, при $a = 6$ м на частоте 1,9 МГц будем иметь $Q \geq 78$. Так как для ЭМА $a \ll \lambda$, то $ka < 1$, при этом в формуле (2) значением $1 / ka$ можно пренебречь, и тогда получим [8]:

$$Q \geq \frac{1}{(ka)^3}. \quad (3)$$

Добротность реальных антенн может приближаться к пределу (2) сверху, но не нарушает его. Следует отметить, что антенны простой конструкции, форма которых далека от сферической (симметричный вибратор, монополь и т.п.) имеют добротность, существенно превышающую предел Чу. Для антенн такого типа, вписанных в цилиндр и трехосный эллипсоид, оценка предельной добротности дана в [9].

В [6] вводится понятие диапазона частот, в пределах которого КСВ антенны при подключении к фидеру не превышает определенной заданной величины. В англоязычных статьях этот диапазон называется *matched voltage standing wave ratio fractional bandwidth (FBW)* и определяется следующим образом:

$$FBW = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \approx \frac{1}{Q} \frac{s-1}{\sqrt{s}}, \quad (4)$$

где f_2 и f_1 представляют собой соответственно верхнюю и нижнюю границы диапазона, f_0 – центральная частота, s – заданный предел КСВ. Часто значение *FBW* приводится в процентах. Для РНС «Спрут-Н1» [2, 10] эти величины составляют: $f_1 = 1,66$ МГц, $f_2 = 2,16$ МГц, $f_0 = 1,91$ МГц, $FBW = 26.2$ %.

На рисунке 1 показан *FBW* в зависимости от электрического размера ka антенн без потерь, т.е. с КПД $\eta = 100$ %, при разных пределах КСВ s .

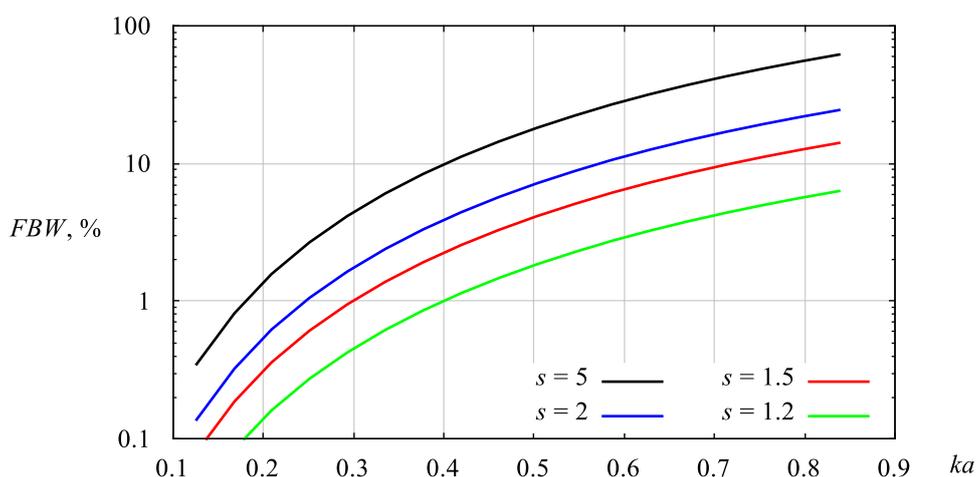


Рис. 1. Достижимый диапазон частот по заданному уровню КСВ.

В применении к средневолновым локальным РНС следует, что для получения $FBW = 27\%$ по уровню $КСВН = 1.5$, потребуется антенна радиусом не менее 28 м.

Например, высота корабельной антенны РНС «Спрут-Н1» ограничена 6 метрами [10]. На центральной частоте 1,9 МГц длина волны $\lambda \approx 158$ м. Тогда $ka = 2\pi / 158 \cdot 6 \approx 0.239$ и $Q \geq 78$. Из приведенных выше графиков следует, что при этом FBW даже по уровню $КСВ \leq 5$ не может быть более нескольких процентов. Добротность реальных конструкций антенн, как отмечалось, всегда превышает предел Чу, и FBW будет еще меньше.

Таким образом, обеспечить требуемую для средневолновых РНС ширину полосы рабочих частот приемной антенны с использованием пассивных согласующих цепей даже теоретически не представляется возможным.

2. Моделирование приемных электрически малых антенн с одинаковыми размерами

С целью определения наиболее оптимальных вариантов конструкции ЭМА, оценки эффективности и возможных ограничений проведено электродинамическое моделирование с помощью метода моментов. Рассмотрены такие антенны, как многозаходная спиральная, монополь со спиральной нагрузкой, спирали с вариацией радиуса и расстояния между витками.

В соответствии с выводами из [11], нагрузка антенн принята чисто активной. В результате моделирования получены следующие характеристики: зависимость комплексного входного сопротивления Z от частоты, выделяемая в нагрузке мощность при подаче плоской волны с горизонта P , зависимость группового времени запаздывания (ГВЗ) от частоты, полоса пропускания $\Delta f / f_0$ по уровню половины от максимальной принимаемой мощности, коэффициент направленного действия D .

Материалом всех моделей является идеальный проводник, радиус проводов $r = 2$ мм. Все антенны располагаются на бесконечной идеально проводящей плоскости.

Помимо частотных характеристик, также были рассчитаны амплитудные ДН в азимутальной плоскости на частоте 1,9 МГц. Для всех рассмотренных вариантов антенн ДН имеет форму, близкую ко всенаправленной (окружность) с практически незаметной неравномерностью, и поэтому эти графики не приводятся.

На рисунке 2 показаны антенны, моделирование которых было проведено. При отличающихся конструкциях габариты антенн были заданы одинаковыми: высота 6 м и диаметр 1 м. Это позволяет провести объективное сравнение между разными типами антенн и выявить их преимущества и ограничения.

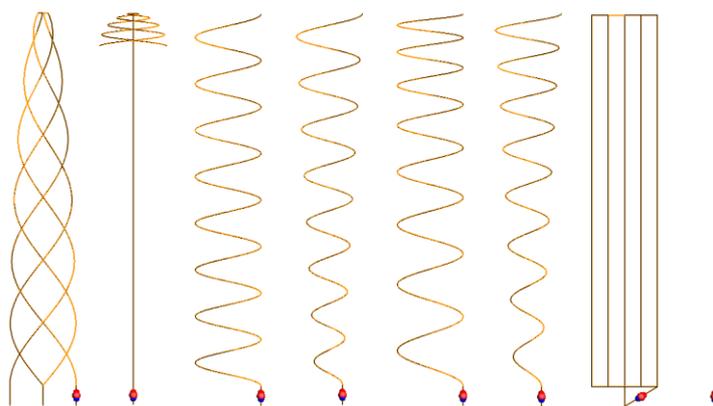


Рис. 2. Моделируемые антенны. Слева направо: многозаходная спиральная антенна, монополь со спиральной нагрузкой, спиральная антенна, спиральная антенна с увеличивающимся радиусом, спиральная антенна с изменяющимся расстоянием между витками, спиральная антенна с увеличивающимся радиусом и изменяющимся расстоянием между витками, свернутый монополь, прямолинейный монополь.

2. Сравнение характеристик

На рисунках 4–8 показаны характеристики моделируемых антенн. Легенда на графиках приведена на рисунке 3.

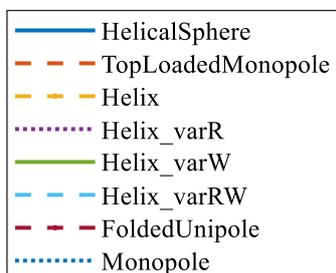


Рис. 3. Легенда к графикам на рисунках 4–8.

На рисунке 3 приняты следующие обозначения:

- HelicalSphere – Многозаходная спиральная антенна,
- TopLoadedMonopole – Монополь со спиральной нагрузкой,
- Helix – Спиральная антенна,
- Helix_varR – Спиральная антенна с увеличивающимся радиусом,
- Helix_varW – Спиральная антенна с изменяющимся расстоянием между витками,
- Helix_varRW – Спиральная антенна с увеличивающимся радиусом и изменяющимся расстоянием между витками,
- FoldedUnipole – Свернутый монополь,
- Monopole – Прямолинейный монополь.

Как видно из приведенных рисунков, все антенны имеют весьма низкое значение действительной части входного сопротивления R_a и во много раз превышающую его по модулю мнимую часть X_a . Причем, для многозаходной спиральной антенны и свернутого монополя действительная часть сопротивления крайне мала, а мнимая часть сопротивления имеет индуктивный характер, что связано с относительно большой (по сравнению с остальными рассмотренными антеннами) длиной проводников, образующих антенну. Для остальных типов антенн характер мнимой части сопротивления емкостной.

Найдем зависимость мощности P от сопротивления нагрузки R_n по методике, приведенной в [11]. Следует отметить, что в настоящей работе в отличие от [11] используются амплитудные значения для тока и напряжения, а не действующие (среднеквадратические). ЭДС эквивалентного источника в антенне определяется как

$$V = \frac{E\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{R_a}{80}}, \quad (5)$$

где E – амплитуда электромагнитной волны, падающей на антенну. Ток в приемной цепи:

$$\dot{I} = \frac{V}{R_n + R_a + jX_a}. \quad (6)$$

Мощность в нагрузке, после преобразований:

$$P = I^2 R_n = V^2 \frac{R_n}{(R_n + R_a)^2 + X_a^2}. \quad (7)$$

Для определения максимума функции $P(R_n)$ возьмем производную:

$$\frac{dP}{dR_n} = V^2 \frac{R_a^2 + X_a^2 - R_n^2}{(R_a^2 + 2R_a R_n + X_a^2 + R_n^2)^2}. \quad (8)$$

Максимум будет иметь место при $dP / dR_n = 0$, т.е.

$$\begin{aligned} R_a^2 + X_a^2 - R_n^2 &= 0, \\ R_n &= \sqrt{R_a^2 + X_a^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

То есть, для передачи максимальной мощности в нагрузку ее сопротивление должно равняться модулю полного входного сопротивления антенны. Для электрически малых антенн $X_a \gg R_a$, тогда (9) можно приближенно записать в виде

$$R_n \approx X_a. \quad (10)$$

Далее величина R_n из (10), соответствующая максимальной мощности в нагрузке, обозначается как R_{opt} .

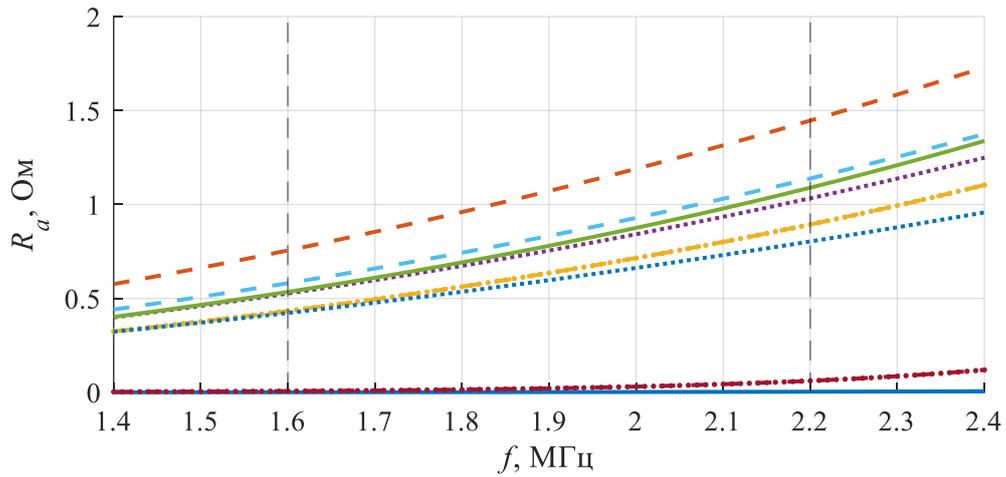


Рис. 4. Действительная часть входного сопротивления антенн.

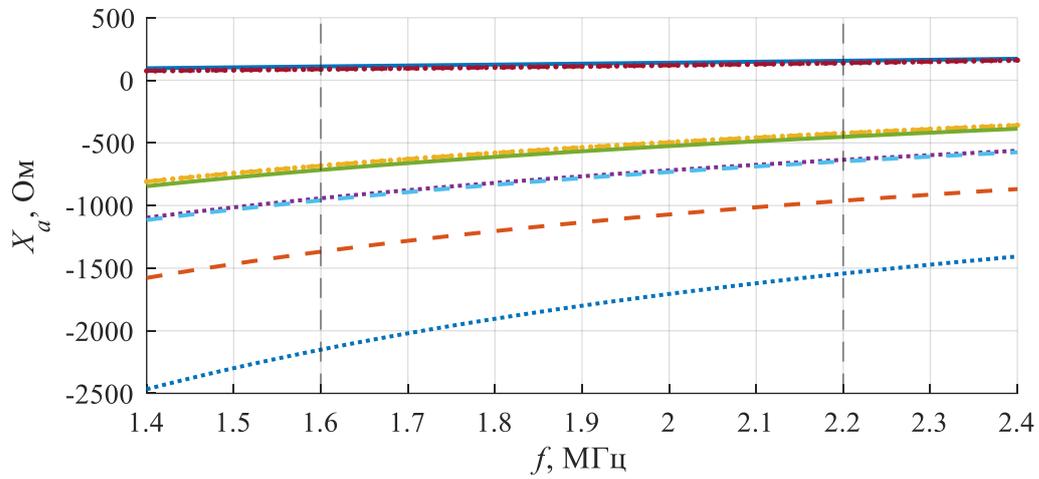


Рис. 5. Мнимая часть входного сопротивления антенн.

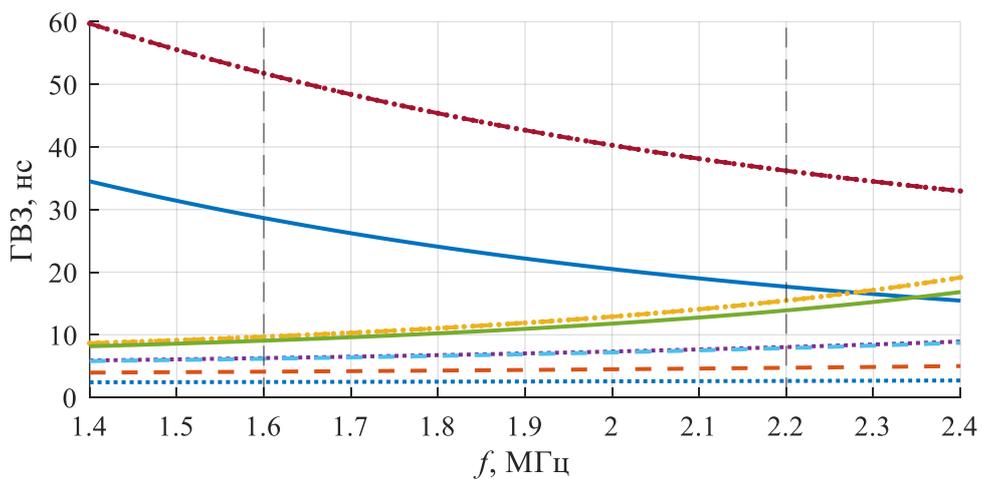


Рис. 6. ГВЗ принятого антеннами сигнала в зависимости от частоты при сопротивлении нагрузки $R_n = 50$ Ом.

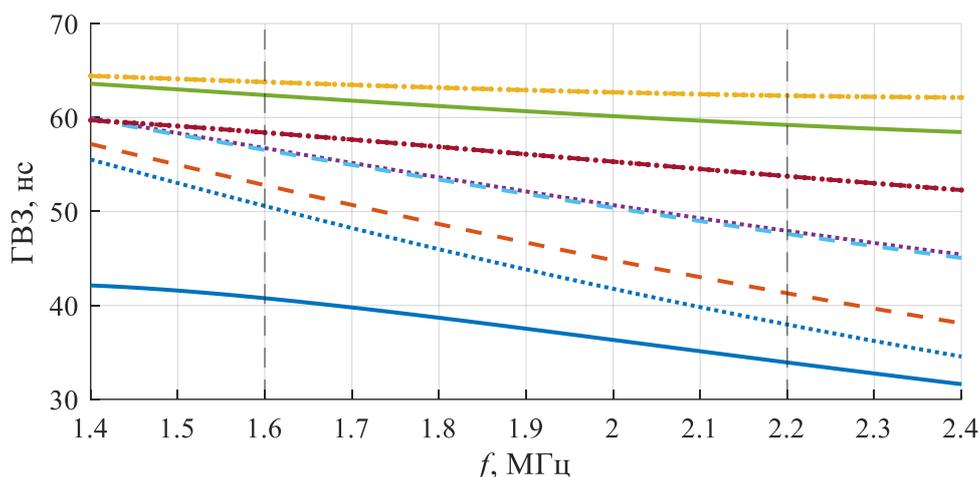


Рис. 7. ГВЗ принятого антеннами сигнала в зависимости от частоты при сопротивлении нагрузки $R_n = R_{opt}$.

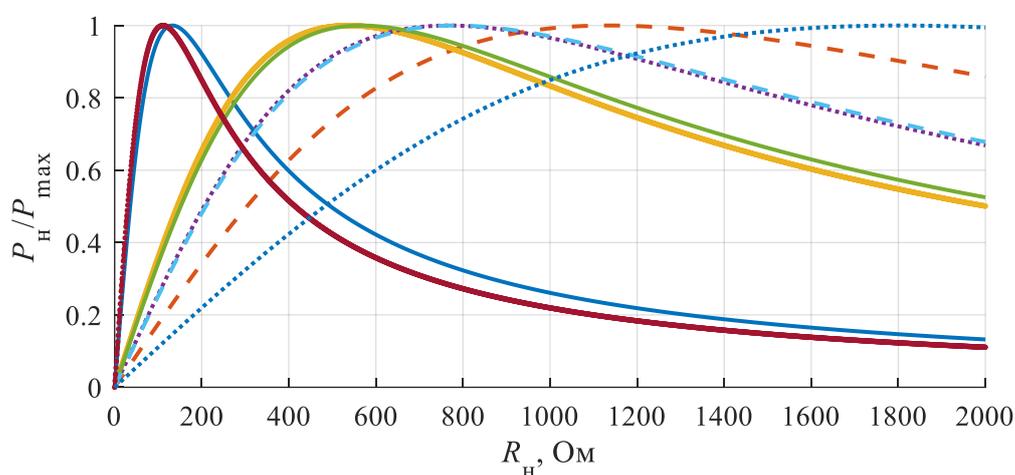


Рис. 8. Нормированная мощность в нагрузке в зависимости от величины сопротивления нагрузки.

В таблицах 1 и 2 приведены численные значения параметров рассмотренных антенн. Как было указано ранее, все антенны имеют одинаковую высоту 6 м и ширину (максимальный диаметр) 1 м. При этом оценка неравномерности группового времени запаздывания (Δ ГВЗ) проведена в полосе частот 1,6 МГц – 2,2 МГц.

Таблица 1. Сравнение различных вариантов конструкций ЭМА при $R_n = 50 \text{ Ом}$.

Тип антенны	$Z(f_0)$, Ом	P_n , мВт	$\Delta\text{ГВЗ}$, нс
Многозаходная спиральная антенна	$0+j132,84$	0,1	11
Монополь со спиральной нагрузкой	$1,07-j1134,62$	1,3	0,6
Спиральная антенна	$0,64-j536,43$	3,5	5,8
Спиральная антенна с изменением радиуса	$0,75-j766,76$	2	1,8
Спиральная антенна с изменением расстояния между витками	$0,78-j566,89$	3,8	4,8
Спиральная антенна с изменением радиуса и расстояния между витками	$0,83-j781,12$	2,1	1,7
Свернутый монополь	$0,02+j111,07$	2,3	15,6
Прямолинейный монополь	$0,6-j1800,19$	0,3	0,17

Таблица 2. Сравнение различных вариантов конструкций ЭМА при оптимальном сопротивлении нагрузки.

Тип антенны	$R_{n \text{ опт}}$, Ом	P_n , мВт	$\Delta\text{ГВЗ}$, нс
Многозаходная спиральная антенна	133	0,16	6,8
Монополь со спиральной нагрузкой	1135	14,88	11,5
Спиральная антенна	536	18,66	1,5
Спиральная антенна с изменением радиуса	767	15,50	8,8
Спиральная антенна с изменением расстояния между витками	567	21,66	3,2
Спиральная антенна с изменением радиуса и расстояния между витками	781	16,79	8,9
Свернутый монополь	111	3,01	3,5
Прямолинейный монополь	1800	5,23	12,6

Как видно из таблицы 1, при прочих примерно равных характеристиках свернутый монополь обладает самым низким реактивным сопротивлением из всех рассмотренных вариантов.

Далее более подробно рассмотрим зависимость неравномерности ГВЗ от величины сопротивления нагрузки R_n для антенн свернутый монополь и прямолинейный монополь. На рисунках 9 и 10 приведены эти зависимости в сравнении с мощностью, выделяемой в нагрузке. Легко заметить, что значение R_n , при котором наблюдается максимум мощности, не совпадает со значением R_n , соответствующим минимальной неравномерности ГВЗ.

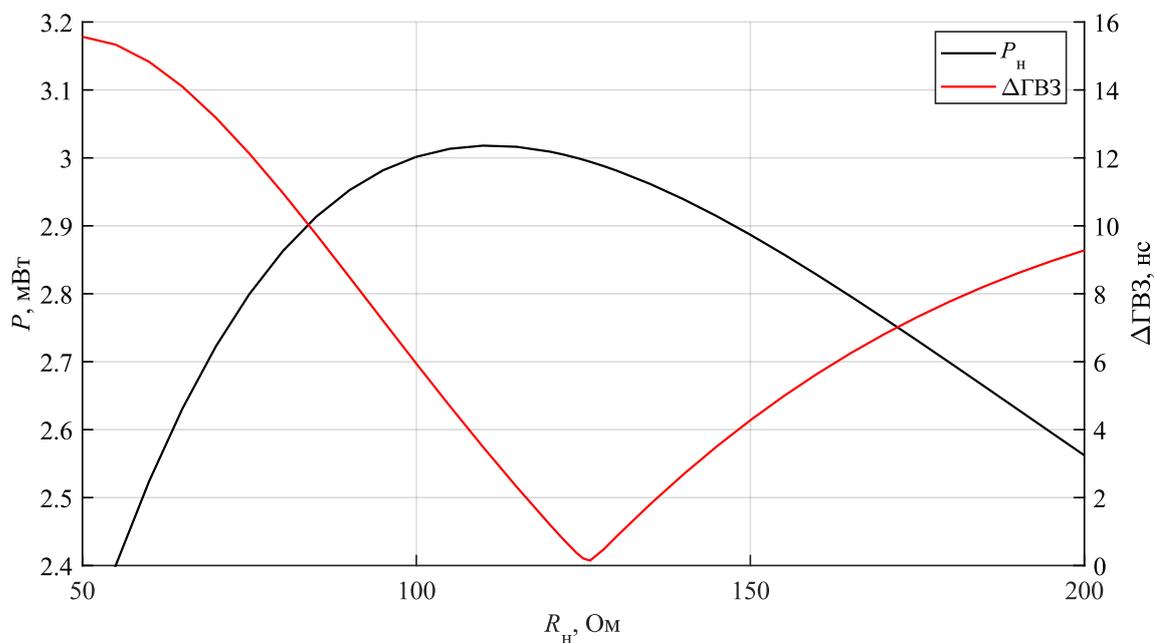


Рис. 9. Мощность в нагрузке и неравномерность ГВЗ в зависимости от сопротивления нагрузки свернутого монополя.

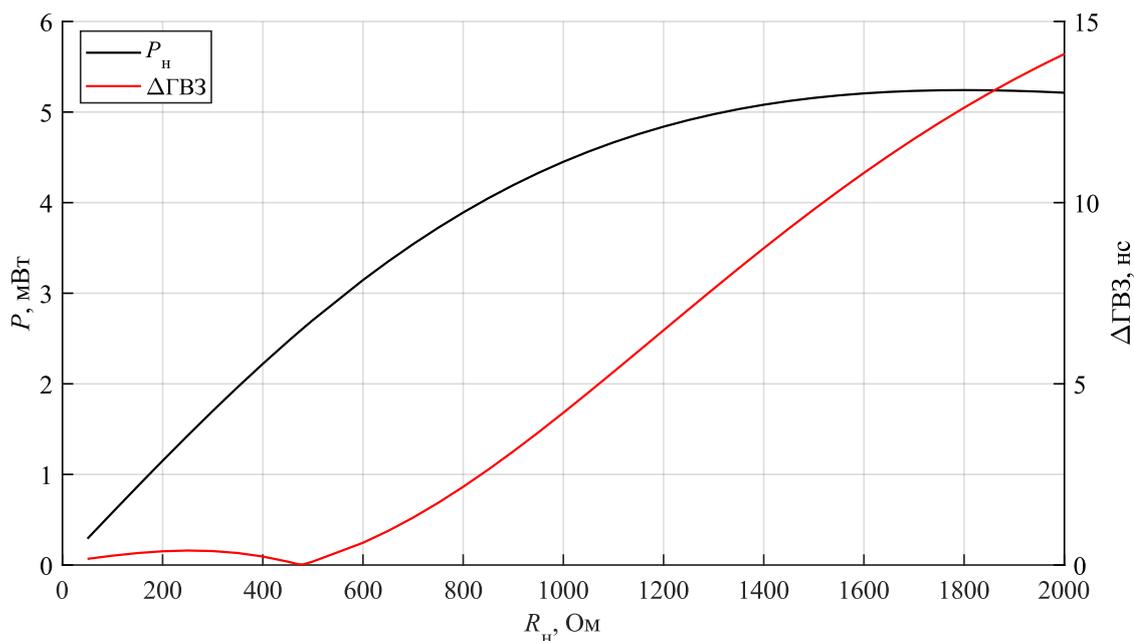


Рис. 10. Мощность в нагрузке и неравномерность ГВЗ в зависимости от сопротивления нагрузки прямолинейного монополя.

Как видно, для достижения максимальной мощности в нагрузке требуется сопротивление нагрузки устанавливать равным модулю входного сопротивления антенны, что соответствует результатам, полученным по выражениям (5)–(10).

Неравномерность ГВЗ прямолинейного монополя может быть уменьшена при уменьшении сопротивления нагрузки до 1000-1500 Ом. Так, при $R_n = 1800$ Ом неравномерность ГВЗ составляет $\Delta GVS = 12,6$ нс, а при

использовании $R_n = 1500$ Ом неравномерность ГВЗ снижается до 9,8 нс, при уменьшении сопротивления до $R_n = 1000$ Ом неравномерность ГВЗ составляет всего 4,2 нс. При этом, различие в уровнях принимаемой мощности остается несущественным ($P_n = 5,2$ мВт при $R_n = 1800$ Ом и $P_n = 4,5$ мВт при $R_n = 1000$ Ом).

Для свернутого монополя неравномерность ГВЗ также может быть снижена за счет использования другого сопротивления нагрузки. Например, при $R_n = 111$ Ом неравномерность ГВЗ составляет $\Delta\text{ГВЗ} = 3,5$ нс, а мощность, выделяемая в нагрузке, составляет $P_n = 3,01$ мВт. При увеличении сопротивления нагрузки до $R_n = 126$ Ом неравномерность ГВЗ снижается до величины $\Delta\text{ГВЗ} = 0,15$ нс, а мощность остается практически на прежнем уровне $P_n = 2,99$ мВт. Также можно выделить основное преимущество свернутого монополя – невысокое (по сравнению с обычным монополем) входное сопротивление, что упрощает его подключение к стандартным усилителям сопротивлением 50 Ом.

Заключение

В работе рассмотрено несколько вариантов ЭМА для применения в качестве приемных антенн локальных средневолновых РНС. Как показало исследование, согласование таких антенн в широкой полосе частот невозможно, а для выделения максимально возможной мощности в нагрузке должно выполняться условие равенства активного сопротивления нагрузки и модуля полного входного сопротивления ЭМА. Однако такое сопротивление нагрузки не обеспечивает наилучшую равномерность ГВЗ. Уменьшить неравномерность ГВЗ можно за счет незначительного снижения мощности, выделяемой в нагрузке, путем выбора сопротивления обеспечивающего все еще приемлемый уровень мощности и небольшую неравномерность ГВЗ. Таким образом, в качестве наиболее перспективных приемных антенн корабельной станции локальной РНС с точки зрения равномерности амплитудно- и фазо-частотных

характеристик при относительной простоте конструкций можно выделить антенны прямолинейный и свернутый монополь.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке «Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта № 20240924-08494 «Исследование влияния подстилающей поверхности на пути распространения радионавигационного сигнала на точность измерения радионавигационных параметров в наземных радионавигационных системах».

Литература

1. Wheeler H.A. Fundamental limitations of small antennas // Proceedings of the IRE. – 1947. – Т. 35. – №. 12. – С. 1479-1484. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1947.226199>
2. Радионавигационный план РФ. Минпромторг РФ, Пр. № 2123 от 28 июля 2015.
3. Dagefu F.T. et al. A survey of small, low-frequency antennas: Recent designs, practical challenges, and research directions // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2021. – Т. 65. – №. 1. – С. 14-26. <https://doi.org/10.1109/MAP.2021.3127559>
4. Панько В.С. и др. Моноконическая антенна диапазона средних волн // Радиотехника. – 2024. – Т. 88. – № 4. – С. 149-157. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202404-15>
5. Колесников А.В., Федосов Д.В., Николаев А.В. Моделирование резонансной спиральной электрически малой антенны // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.13>
6. Yaghjian A.D., Best S.R. Impedance, bandwidth, and Q of antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2005. – Т. 53. – №. 4. – С. 1298-1324. <https://doi.org/10.1109/TAP.2005.844443>
7. Hansen R.C., Collin R.E. Small antenna handbook. – John Wiley & Sons, 2011.
8. Слюсар В. 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2006. – №. 7. – С. 10-19.

9. Балландович С.В. и др. Предельная добротность электрически малых антенн, вписанных в цилиндр и эллипсоид // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2016. – №. 5. – С. 23-29.
10. Селиверстов А.С. Высокоточная радионавигационная система «Спрут-Н1» // Записки по гидрографии. – 2019. – №. 308. – С. 54-64.
11. Князева К.В., Панько В.С., Ерохин А.А., Андреев А.Г., Косолапов А.В., Нелипа С.Б. Выбор сопротивления нагрузки приемной электрически малой антенны по критерию минимальной неравномерности группового времени запаздывания принятого сигнала // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.5>

Для цитирования:

Панько В.С., Ерохин А.А., Андреев А.Г., Князева К.В., Косолапов А.В., Нелипа С.Б. Моделирование электрически малых антенн средневолнового диапазона // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.11>