

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.29>

УДК: 621.396.673

МАСШТАБНЫЙ МАКЕТ КОНИЧЕСКОГО МОНОПОЛЯ ДИАПАЗОНА СРЕДНИХ ВОЛН

В.С. Панько, А.Г. Андреев, А.А. Сенченко, А.А. Ерохин, А.В. Станковский

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

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2023 г.

Аннотация. Наземные радионавигационные системы продолжают играть существенную роль в радионавигации благодаря их высокой помехоустойчивости по сравнению со спутниковыми глобальными навигационными системами. В работе рассматривается моноконическая антенна, предназначенная для излучения и приема радионавигационных сигналов в диапазоне средних волн. Для подтверждения работоспособности планируемого к изготовлению полноразмерного экспериментального образца, на основе принципа электродинамического подобия разработан уменьшенный макет антенны с масштабным множителем $1/200$. Проведено моделирование характеристик макета. Показано, что значение масштабного множителя, а также некоторые изменения в модели, вызванные неточностью изготовления макета, незначительно влияют на частотную характеристику коэффициента отражения. Масштабный макет антенны изготовлен из фольгированных материалов с помощью травления по фотошаблону. Результаты измерения коэффициента отражения показали хорошее совпадение с моделированием.

Ключевые слова: моноконическая антенна, радионавигационная система, средние волны, масштабное моделирование.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Автор для переписки: Панько Василий Сергеевич, vpanko@sfu-kras.ru

Введение

Спутниковая навигация в настоящее время стала основным, а иногда и единственным источником навигационной информации для морских объектов. В тоже время, на фоне повсеместного проникновения спутниковой навигации в различные области человеческой деятельности и возрастающей зависимости от этой технологии, все большее внимание уделяется вопросам ее надежности, достоверности, точности.

Основным недостатком спутниковых радионавигационных систем является низкая помехоустойчивость, по отношению к непреднамеренным и специально формируемым помехам. Она обусловлена крайне малым уровнем радиосигнала у поверхности Земли: -161 дБВт (гарантированный минимум) [1], вследствие большой удаленности до навигационных космических аппаратов. В последние годы участились сообщения о проблемах, связанных с помехоустойчивостью аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем [2,3]. С целью оценки уязвимости бортовых навигационных комплексов, проводятся эксперименты с постановкой помех для спутниковых навигационных систем, включая имитационные [4]. Ожидается, что в дальнейшем ситуация с надежностью спутниковой навигации будет ухудшаться [5], в том числе и из-за увеличения доступности аппаратуры постановки помех.

Несмотря на то, что в последние годы активно ведутся работы по созданию помехоустойчивой аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем, такая аппаратура не решает проблему надежности, достоверности и точности определения координат в определенных ситуациях.

Во-первых, орбиты спутников существующих навигационных систем расположены таким образом, что в северных широтах и приполярных областях точность этих систем существенно ниже [6].

Во-вторых, воздействие солнечного радиоизлучения может приводить к сбоям в работе аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем. Так, во время мощных солнечных вспышек радиоизлучения в декабре 2006 г. возникли массовые кратковременные сбои в навигационных приемниках по всему миру [7].

В-третьих, возможны сбои в работе самих спутниковых навигационных систем, приводящие к долговременному отсутствию навигационной информации.

Указанные проблемы использования спутниковых навигационных систем не могут быть устранены с помощью помехоустойчивой навигационной аппаратуры. 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 [8].

Аналогичным образом обстоит ситуация за рубежом. Например, несмотря на то, что в 2009 г. в США было принято решение о прекращении функционирования наземной навигационной системы LORAN-C, в 2014 г. вновь возник вопрос о необходимости резервных навигационных систем, а в 2018 г. был подписан акт о необходимости создания альтернативной GPS наземной системы. В 2020 г. в Великобритании было проведено исследование, посвященное вопросам надежности, целостности и доступности навигационной информации для морских судов. Результатом работы стал вывод о необходимости в резервной навигационной системе, запланировано создание прототипа наземной системы в 2020 г. с последующим его тестированием в течение двух лет.

В Республике Корея с 2016 г. ведется разработка наземной навигационной системы, а в 2021 г. правительством объявлено о коммерциализации системы eLORAN.

Таким образом, задача модернизации и развертывания наземных систем радионавигации диапазона средних и ультракоротких волн для обеспечения требуемой точности и функциональности является, как никогда, актуальной.

К антеннам стационарных радионавигационных систем (РНС) диапазона средних волн (1,6–2,2 МГц) предъявляются требования низкого уровня коэффициента отражения в широкой полосе рабочих частот, постоянства характеристик, механической надежности при сохранении приемлемых габаритных размеров. Простые конструкции антенн в виде прямолинейного несимметричного вертикального вибратора не удовлетворяют этим требованиям, в первую очередь по уровню согласования в полосе рабочих частот. В наземных РНС используется шумоподобный радионавигационный сигнал [9], ширина полосы частот которого составляет около 25%, или примерно 500 кГц для диапазона средних волн. Электродинамическое моделирование показывает, что даже при использовании согласующих цепей для прямолинейного вертикального вибратора высотой 22 м достигается ширина полосы частот не более 60 кГц. Для улучшения согласования требуется увеличение высоты вибратора, что ограничено техническими возможностями изготовления и в большинстве случаев неприемлемо.

1. Моноконическая антенна

Передачу и прием радионавигационного сигнала в требуемой полосе частот при удовлетворительном согласовании с фидерным трактом может обеспечить антенна моноконической формы, в виде конуса, обращенного вершиной вниз. Электрические размеры антенн такого типа обычно составляют порядка 0,1–0,2 длины волны [10], что относит их к классу электрически малых антенн. Моноконические антенны находят применение в радиосвязи диапазона

коротких волн [11], а также в различных приложениях более высоких частот [12-15].

Модель моноконической антенны приведена на рис. 1. На сверхвысоких частотах часто используются антенны в виде металлического сплошного конуса. В диапазоне средних и коротких волн для снижения массы и ветровой нагрузки антенна должна быть выполнена в виде набора соединенных между собой прямолинейных проводников, далее называемых следующим образом: вертикалы – наклонные проводники, соединенные в нижней части антенны, и образующие конус; радиалы – горизонтальные проводники, соединенные в верхней части антенны, противовесы – проводники, радиально размещенные над подстилающей поверхностью. Кольцевая перемычка в верхнем основании конуса соединяет между собой вертикалы и радиалы. Фидерная линия подключена в нижней части антенны между точками соединения противовесов и вертикалов.

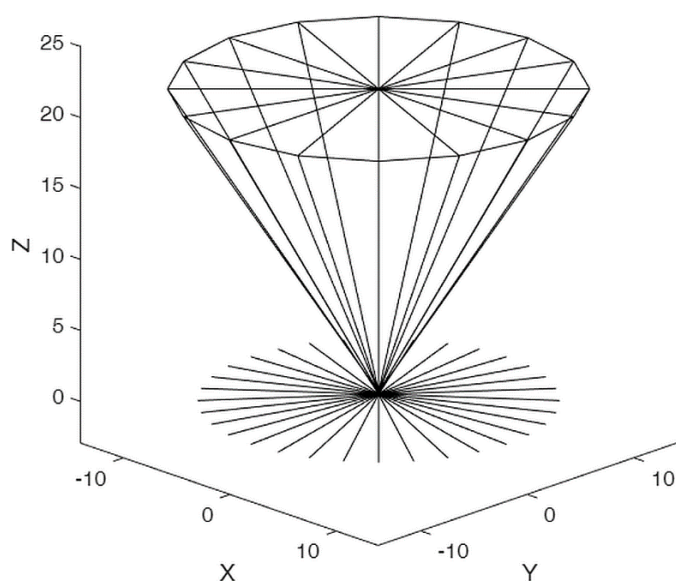


Рис. 1. Модель моноконической антенны

В работе [16] проведены результаты исследований, направленных на оптимизацию параметров моноконической антенны такой конструкции, исходя из приемлемого уровня коэффициента отражения S_{11} , и имеющихся технологических возможностей по изготовлению антенны. Полученная в ходе

моделирования конструкция содержит 16 вертикалов, 16 горизонталов и 32 противовеса, при высоте и диаметре антенны 22 м и 28 м соответственно.

2. Масштабное преобразование

Полноразмерный экспериментальный образец моноконической антенны в диапазоне средних длин волн будет иметь весьма значительные размеры. Изготовление такой антенны для проверки её характеристик представляется затруднительным и потребует больших материальных и временных затрат. Однако, в соответствии с принципом электродинамического подобия, существует возможность кратно уменьшить размеры исследуемой антенны с переносом по частоте ее основных характеристик. Запишем уравнения Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{E} + \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} - \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \sigma \mathbf{E} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{E} – напряженность электрического поля, \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость пространства, σ – проводимость пространства, μ – абсолютная магнитная проницаемость пространства.

Предположим, что все переменные, входящие в уравнение (1), изменились в несколько раз:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= e\mathbf{E}', \quad \mathbf{H} = h\mathbf{H}', \\ \varepsilon &= \varepsilon_1\varepsilon_0, \quad \mu = \mu_1\mu_0, \quad \sigma = \sigma_1\sigma_0, \\ x &= lX, \quad y = lY, \quad z = lZ, \quad t = t_0T. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя выражения (2) в уравнения Максвелла (1) и учитывая, что все операции в (1) линейны, получим:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{E}' + \mu_1 \left[\frac{\mu_0 l}{t_0} \frac{h}{e} \right] \frac{\partial \mathbf{H}'}{\partial T} = 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H}' - \varepsilon_1 \left[\frac{\varepsilon_0 l}{t_0} \frac{e}{h} \right] \frac{\partial \mathbf{E}'}{\partial T} - \sigma_1 \left[\sigma_0 l \frac{e}{h} \right] \mathbf{E}' = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Выделим из системы уравнений (3) полученные множители:

$$\begin{aligned}\frac{\mu_0 l}{t_0} \left(\frac{e}{h} \right) &= \text{const}, \\ \frac{\varepsilon_0 l}{t_0} \left(\frac{e}{h} \right) &= \text{const}, \\ \sigma_0 l \left(\frac{e}{h} \right) &= \text{const}.\end{aligned}\tag{4}$$

Если варьировать введенные масштабные множители так, чтобы выражения (4) оставались неизменными, то это, очевидно, никак не отразится на решении уравнений Максвелла. Для геометрического моделирования величины электромагнитных полей должны остаться неизменными, и константы e и h равны единице. Кроме того, окружающее антенну пространство в рассматриваемой задаче не обладает магнитными свойствами, следовательно, константа μ_0 также равна единице. Тогда три выражения из (4) сведутся к двум:

$$\begin{aligned}\sigma l &= \text{const}, \\ \frac{l}{T} &= \text{const}.\end{aligned}\tag{5}$$

Из этих соотношений видно, что для уменьшения изучаемого объекта в некоторое количество раз, определяемое коэффициентом l , и сохранении его частотных характеристик, необходимо во столько же раз увеличить частоту сигнала и проводимость используемых материалов.

3. Моделирование масштабного макета

Для проведения численного моделирования характеристик масштабного макета в САПР CST Studio Suite разработана параметризованная модель антенны (рис. 2). При создании такой модели использован параметр k – масштабный множитель модели, при изменении которого автоматически меняются геометрические размеры модели, проводимость материалов и частотный диапазон. Модель располагается на подстилающей поверхности, имитирующей поверхность земли в месте установки антенны, при этом электрофизические параметры поверхности также могут быть заданы.

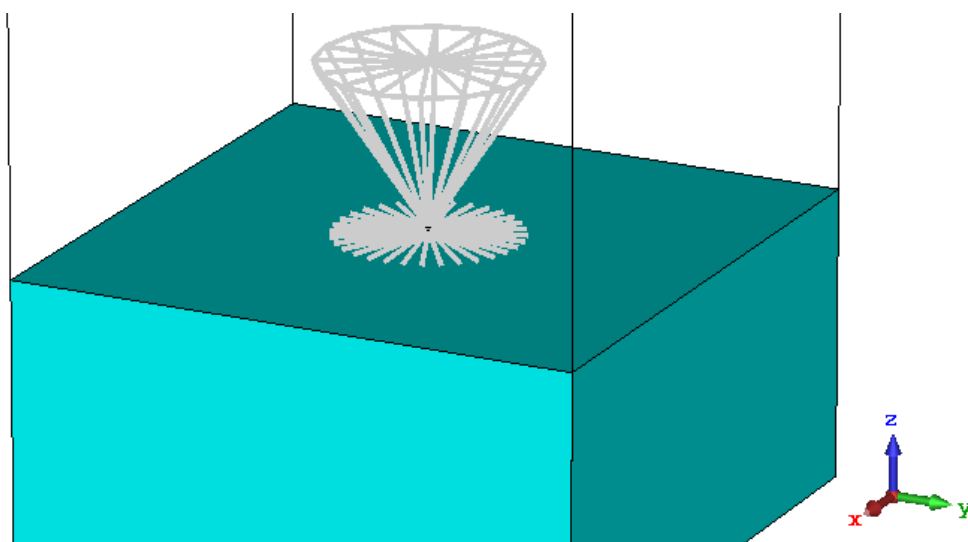


Рис. 2. Параметрическая электродинамическая модель

Данная модель была проанализирована с четырьмя различными значениями масштабного коэффициента k : 1 (полноразмерная модель), 10, 100, 200. Размеры модели изменяются обратно пропорционально величине k . В результате моделирования были получены частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} при разных типах подстилающей поверхности. Для возможности сравнения, все полученные характеристики были приведены к одному частотному диапазону путем умножения частотной шкалы на значение $200/k$. В этом случае, рабочий диапазон частот полноразмерной антенны от 1.61 до 2.21 МГц будет соответствовать частотам от 322 МГц до 442 МГц. Результаты моделирования приведены на рис. 3 и 4.

Как видно из графиков, при расположении антенны на «средней» земле достигается уровень $S_{11} < -10$ дБ в диапазоне 330...475 МГц, что дает ширину полосы рабочих частот около 36%. Размещение антенны в свободном пространстве приводит к некоторому повышению уровня S_{11} и смещению его минимума в высокочастотную область. В дальнейшем исследовании производится для этой ситуации, что существенно упрощает процесс изготовления и измерения характеристик масштабного макета.

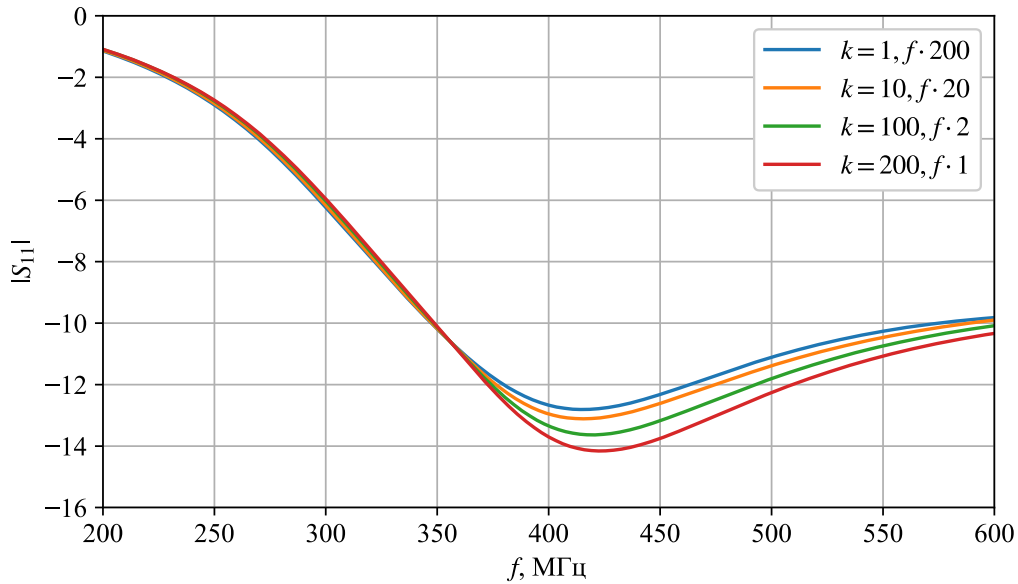


Рис. 3. Частотная зависимость S_{11} для модели с различными масштабными коэффициентами, подстилающая поверхность «средняя земля» ($\epsilon = 4$, $\sigma = 0.001$ См/м)

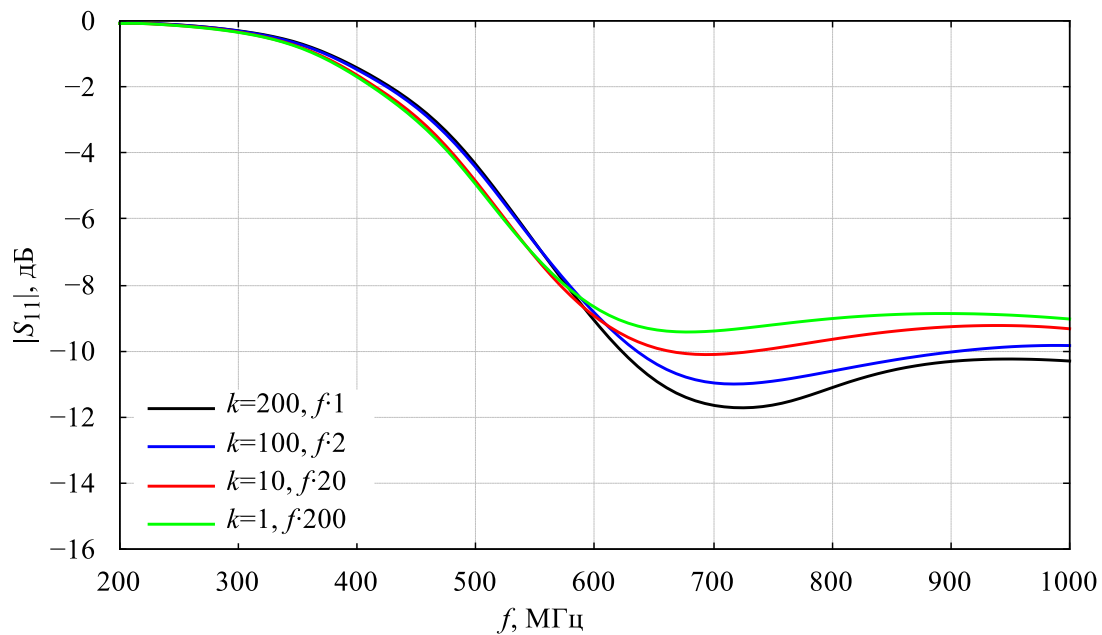


Рис. 4. Частотная зависимость S_{11} для модели с различными масштабными коэффициентами, свободное пространство

Полученные результаты также показали некоторую зависимость частотной характеристики коэффициента отражения от масштабного множителя. Данная зависимость вызвана наличием в модели коаксиальной питающей линии, размеры которой не зависят от масштабного множителя (рис. 4). В связи с небольшой величиной зависимости (изменение S_{11} около 1,8 дБ в рабочем

диапазоне частот), рассмотренный метод масштабного преобразования признан пригодным для построения масштабного макета и оценки характеристик полноразмерного образца антенны.

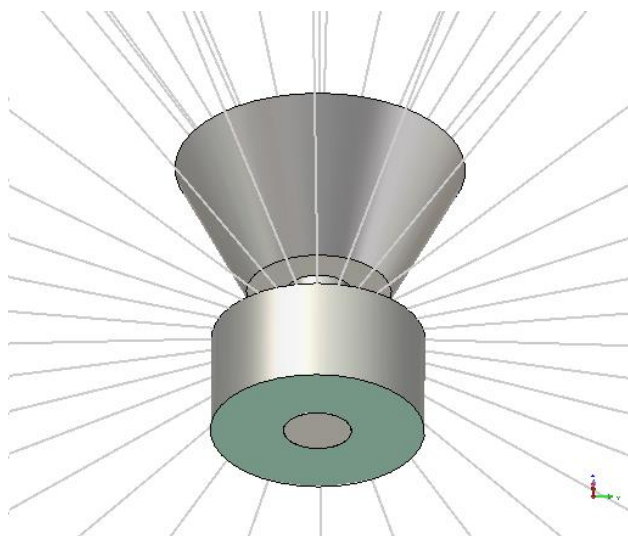


Рис. 4. Коаксиальная питающая линия

4. Изготовление макета и экспериментальные результаты

Величина масштабного коэффициента k может быть определена, исходя из соображений удобства изготовления масштабного макета и проведения измерений. Основные габаритные размеры макета для разных значений коэффициента приведены в таблице 1, при этом $k = 1$ соответствует случаю полноразмерной антенны. Исходя из приведенных выше требований, для изготовления макета выбран масштабный коэффициент $k = 200$.

Таблица 1. Основные размеры макета для разных масштабных коэффициентов

Масштабный коэффициент k	Высота антенны, м	Диаметр антенны, м	Длина противовесов, м
1	22.00	28.00	12.00
10	2.20	2.80	1.20
100	0.22	0.28	0.12
200	0.11	0.14	0.06

Для уменьшенного в $k = 200$ раз макета антенны рабочий диапазон частот будет лежать в пределах от $1.6 \text{ МГц} \cdot 200 = 320 \text{ МГц}$ до $2.2 \text{ МГц} \cdot 200 = 440 \text{ МГц}$.

Моделировать частотные характеристики будем в диапазоне от $1.0 \text{ МГц} \cdot 200 = 200 \text{ МГц}$ до $5.0 \text{ МГц} \cdot 200 = 1000 \text{ МГц}$.

Перед изготовлением макета необходимо проверить чувствительность его характеристик к погрешностям изготовления. Для этого проведен расчет частотной характеристики $|S_{11}|$ с различными изменениями в модели. Изменялись зазор между противовесами и нижней частью конуса ($0,75 \dots 2,25 \text{ мм}$); наклон противовесов ($0 \dots 5^\circ$); наличие диэлектрической подложки из материала FR-4. Моделирование подтвердило, что указанные изменения приводят к незначительному изменению (в пределах $0,5 \text{ дБ}$) частотной характеристики S_{11} .

Фотографии изготовленного макета представлены на рис. 5. Элементы антенны получены травлением по фотошаблону: противовесы на фольгированном стеклотекстолите FR-4, коническая часть (радиалы и вертикалы) – на гибком фольгированном лавсане.

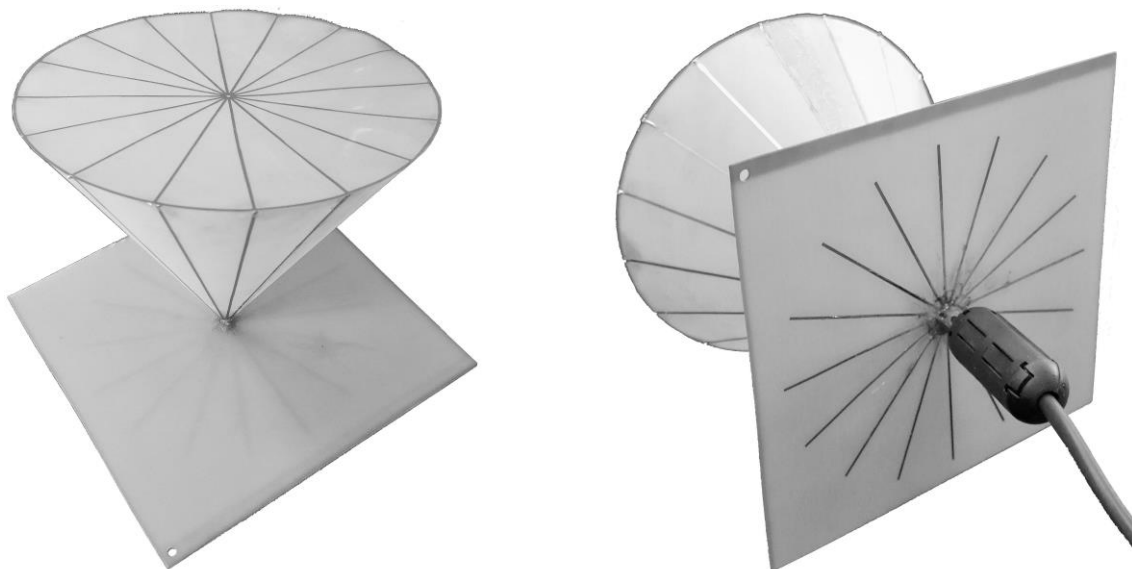


Рис. 5. Внешний вид изготовленного макета

Антенна подключается к измерительному прибору коаксиальным кабелем сопротивлением 50 Ом , центральная жила которого припаяна к нижней точке соединения вертикалов, а оплетка припаяна по кругу к противовесам. Необходимо принять специальные меры (симметрирование) для исключения протекания токов по внешней поверхности коаксиального кабеля, в противном случае коаксиальный кабель становится излучающей частью антенны, что

приводит к искажению формы диаграммы направленности и появлению нежелательных резонансов на частотной характеристике S_{11} . В макете для этой цели использованы ферритовые кольца, надетые на кабель.

Измерения коэффициента отражения проведены с помощью векторного анализатора цепей «Обзор 304/1» производства ПЛАНАР. Результаты измерения S_{11} для масштабного макета, расположенного в свободном пространстве, демонстрируют хорошее совпадение с результатами электродинамического моделирования (рис. 6). Более низкий уровень коэффициента отражения в рабочем диапазоне частот может быть достигнут с помощью широкополосных согласующих цепей.

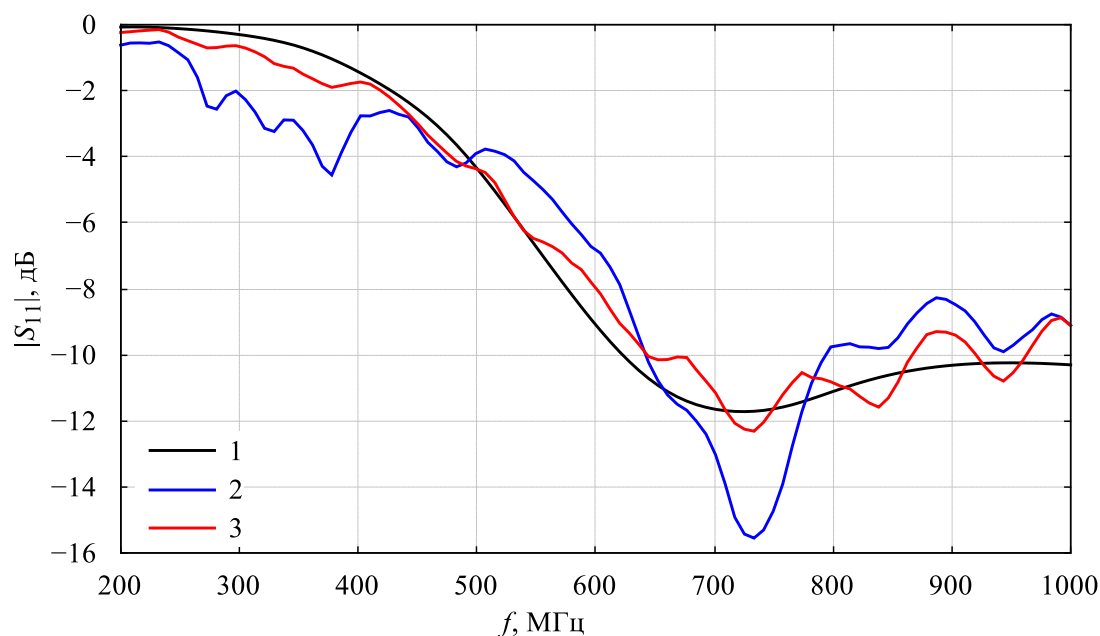


Рис. 6. Коэффициент отражения масштабного макета: (1) расчет по электродинамической модели; (2) измерения макета без симметрирования; (3) измерения макета с симметрированием

Заключение

Проведенные моделирование и измерение характеристик масштабного макета показывают, что моноконическая антенна, выполненная в виде набора соединенных между собой прямолинейных проводников, может обеспечить уровень коэффициента отражения не выше минус 10 дБ в рабочей полосе частот при установке на подстилающую поверхность с параметрами «средней земли».

На основе полученных результатов исследования масштабного макета начата разработка и построение полноразмерного экспериментального образца моноконической антенны, работающего в диапазоне средних волн.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Литература

1. ГЛОНАСС Г. Навигационный радиосигнал в диапазонах L3 с открытым доступом и кодовым разделением. // *Интерфейсный контрольный документ* Редакция 5.1. – Т. 1. – 2008.
2. Buesnel G. Threats to satellite navigation systems // *Network Security*. – 2015. – V. 2015. – №. 3. – P. 14-18.
3. Issam S. M., Adnane A., Madiabdessalam A. I. T. Anti-Jamming techniques for aviation GNSS-based navigation systems: Survey // *2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*. – IEEE, 2020. – P. 1-4.
4. В. Н. Харисов, А.А. Оганесян, Проблема имитационных помех для открытых сигналов ГНСС. *Научно-технические серии. Серия «Радиосвязь и радионавигация». Выпуск 3. Радионавигационные технологии* // Под ред. А. И. Перова, И. Б. Власова.
5. G. Shaw. Maritime Resilience and Integrity in Navigation 4000126063/18/NL/MP NAVISP-EL3-001, 25 March 2020.
6. Zhang Q. et al. A refined metric for multi-GNSS constellation availability assessment in polar regions // *Advances in Space Research*. – 2020. – V. 66. – №. 3. – P. 655-670.
7. Демьянов В. В. Срыв сопровождения сигналов навигационных спутников под воздействием солнечных вспышек радиоизлучения // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2008. – Т. 13. – №. 12. – С. 52-60.

8. *Правила по оборудованию морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть V. Навигационное оборудование.* НД № 2-020101-127. Санкт-Петербург, 2020.
9. Агафонников А. М. *Фазовые радиогеодезические системы для морских исследований.* – Наука, 1979.
10. Chang K. *RF and Microwave Engineering* // A John Wiley & Sons, Inc., Publication. – 2005. – V. 2.
11. Zhang X. L., Gao H. T., Zhang Q. C. An optimum design of low-profile ultra-wideband HF skeletal wire duoconical monopole antenna with parasitic grounded poles // *2016 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC).* – IEEE, 2016. – P. 264-267.
12. Gandomi M. H., Zarifi D. Design and development of ultra-wideband 3-D monopole antennas based on supercurves // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* – 2021. – V. 69. – №. 12. – P. 8214-8220.
13. Keum K., Choi J. An ultra-wideband 3-stage monocone antenna with top-hat loading // *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting.* – IEEE, 2020. – P. 469-470.
14. Hynes C. G., Vaughan R. G. Conical monopole antenna with integrated tunable notch cavity filters // *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting.* – IEEE, 2020. – P. 199-200.
15. Bal A., Filipovic D. S. Wideband Monocone with Integrated Coaxial Bandpass Filter for UAV Applications // *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI).* – IEEE, 2022. – P. 1996-1997.
16. Панько В. С., Саломатов Ю. П., Баскова А. А. Оптимизация формы антенны в виде конического монополя // *Современные проблемы радиоэлектроники.* – 2022. – С. 274-279.

Для цитирования:

Панько В.С., Андреев А.Г., Сенченко А.А., Ерохин А.А. Станковский А.В. Исследование масштабного макета моноконической антенны диапазона средних волн // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.29>

