

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО КОНИЧЕСКОГО МОНОПОЛЯ ДИАПАЗОНА СРЕДНИХ ВОЛН

Научная статья

Панько В.С.<sup>1,\*</sup>, Ерохин А.А.<sup>2</sup>, Сенченко А.А.<sup>3</sup>, Андреев А.Г.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-5499-1880;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-7707-8792;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

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

**Аннотация**

Антенны стационарных радионавигационных систем диапазона средних волн должны обеспечивать полосу рабочих частот по уровню КСВ  $< 1.5$  не менее 500 кГц. Простые конструкции антенн в виде прямолинейного несимметричного вертикального вибратора не удовлетворяют этому требованию, либо должны иметь слишком большую высоту. Вместе с тем известен тип антенны *Monocone*, представляющей собой перевернутый конус и обеспечивающей существенно более широкую полосу частот при сравнительно малой высоте.

В работе описана математическая модель антенны *Monocone*, проведено электродинамическое моделирование ее характеристик. Определены параметры конструкции антенны, оптимальные с точки зрения обеспечения согласования в рабочей полосе частот при сохранении приемлемых габаритных размеров антенны.

**Ключевые слова:** радионавигация, широкополосный монополю, согласование.

**RESEARCH OF A BROADBAND CONE MONOPOLE OF THE MEDIUM WAVE RANGE**

Research article

Panko V.S.<sup>1,\*</sup>, Erokhin A.A.<sup>2</sup>, Senchenko A.A.<sup>3</sup>, Andreev A.G.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-5499-1880;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-7707-8792;<sup>1, 2, 3, 4</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

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

**Abstract**

Antennas for fixed mid-wave radio navigation systems must provide an operating frequency bandwidth of at least 500 kHz in terms of VSW  $< 1.5$ . Simple antenna designs in the form of a rectilinear asymmetrical vertical vibrator do not meet this requirement, or must be of too large a height. However, there is a known type of antenna *Monocone*, which is an inverted cone and provides a significantly wider frequency band at a relatively low height.

The mathematical model of the *Monocone* antenna is described in the work, and the electrodynamic modeling of its characteristics is made. The parameters of the antenna design, optimal from the point of ensuring coordination in the operating frequency band while maintaining acceptable overall dimensions of the antenna, were determined.

**Keywords:** radio navigation, broadband monopole, coordination.

**Введение**

К антеннам стационарных радионавигационных систем диапазона средних волн (1,6-2,2 МГц) предъявляются требования низкого уровня КСВ 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. Электродинамическое моделирование показывает, что даже при использовании согласующих цепей для прямолинейного вертикального вибратора высотой 22 м ширина полосы частот по уровню КСВ  $< 2$  составляет не более 60 кГц, тогда как полоса рабочих частот радионавигационной системы средних волн равна 500 кГц. Для улучшения согласования требуется увеличение высоты вибратора, что ограничено техническими возможностями изготовления и в большинстве случаев неприемлемо.

Существенно более широкой полосой рабочих частот обладают биконические антенны и антенны в форме конического монополя. Теоретическое обоснование их функционирования было приведено еще в статьях [1] и [2], там же показано, что биконическая антенна неограниченных размеров может обладать неограниченной же полосой рабочих частот.

Несмотря на давнюю историю, интерес к антеннам такого типа сохраняется. В диапазоне средних волн антенны в виде сплошного конуса неприменимы, поскольку будут обладать неприемлемо большой массой и ветровой нагрузкой. В связи с этим используется аппроксимация конусов в виде набора радиальных проводников. Исследованию антенн такого типа посвящено множество работ: в [3] с помощью электродинамического моделирования проведен анализ характеристик проволочной биконической антенны в зависимости от ее конструктивных параметров, в статье [4] проведены аналогичные исследования для проволочной моноконической антенны, расположенной над идеально проводящей поверхностью. Результаты экспериментальных исследований моноконической антенны приводятся в [5]. Статья [6] описывает модификацию антенны, состоящую из двух конусов, соединенных основаниями. Вопросы

расширения рабочей полосы частот при сохранении вертикальных габаритов моноконической антенны уделяется внимание в [7].

Во всех упомянутых работах рассматриваются антенны в виде набора радиальных проводников, расходящихся из вершины конуса. Как будет показано ниже, добавление дополнительных проводников, образующих "сетчатую" конструкцию антенны, позволяет получить дополнительное расширение полосы рабочих частот в низкочастотную область. Также приведенных в статьях не рассматривается влияние на характеристики антенны подстилающей земной поверхности, и расположенных на ней противовесов, что принципиально важно в диапазоне средних волн.

Темой настоящей работы является поиск конструкции антенны, оптимальной с точки зрения указанных выше требований. Далее такой тип антенн называется *Monoscone*.

### Методы и принципы исследования

Модель антенны *Monoscone* представляет собой набор соединенных между собой прямолинейных проводников. Для обозначения составных элементов модели далее приняты следующие названия (рисунок 1): вертикалы – наклонные проводники, соединенные в нижней части антенны в точке  $D$ , и образующие нижний конус; горизонталы – горизонтальные кольцообразные проводники, соединяющие между собой вертикалы; радиалы – наклонные проводники, соединенные в верхней части антенны в точке  $H$ , и образующие верхний конус; кольца – проводники, аналогичные горизонталам, соединяющие между собой радиалы. К кольцам относится также перемычка между вертикалами в точках соединения их с радиалами. Противовесы – радиально расположенные вблизи поверхности земли проводники, соединенные в точке  $P$ ; мачта – центральный вертикальный проводник, соединяющий точки  $H$  и  $D$ . Питание антенны осуществляется включением симметричного источника между точками  $P$  и  $D$ . Соответствующий проводник далее называется сегментом питания.

Модель описывается следующими общими параметрами:  $h$  – высота антенны, м;  $d$  – длина сегмента питания, м;  $O$  – начало координат;  $H$  – верхняя точка сборки радиалов;  $D$  – нижняя точка сборки вертикалов (первая точка питания);  $P$  – точка сборки противовесов (вторая точка питания).

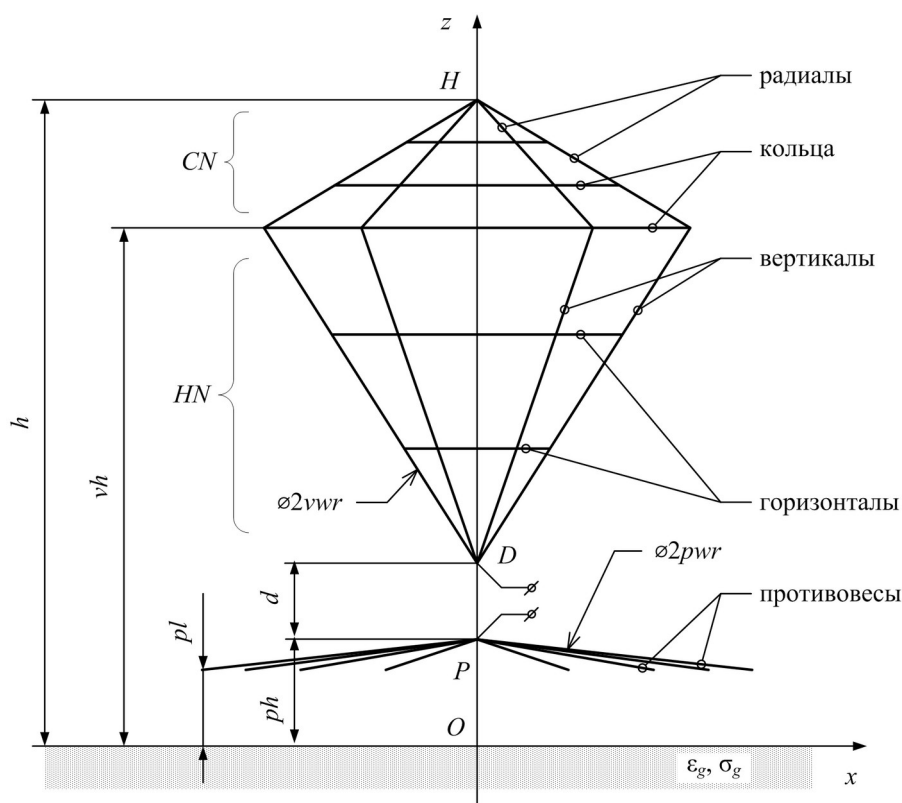


Рисунок 1 - Модель антенны *Monoscone*, вид сбоку

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.1>

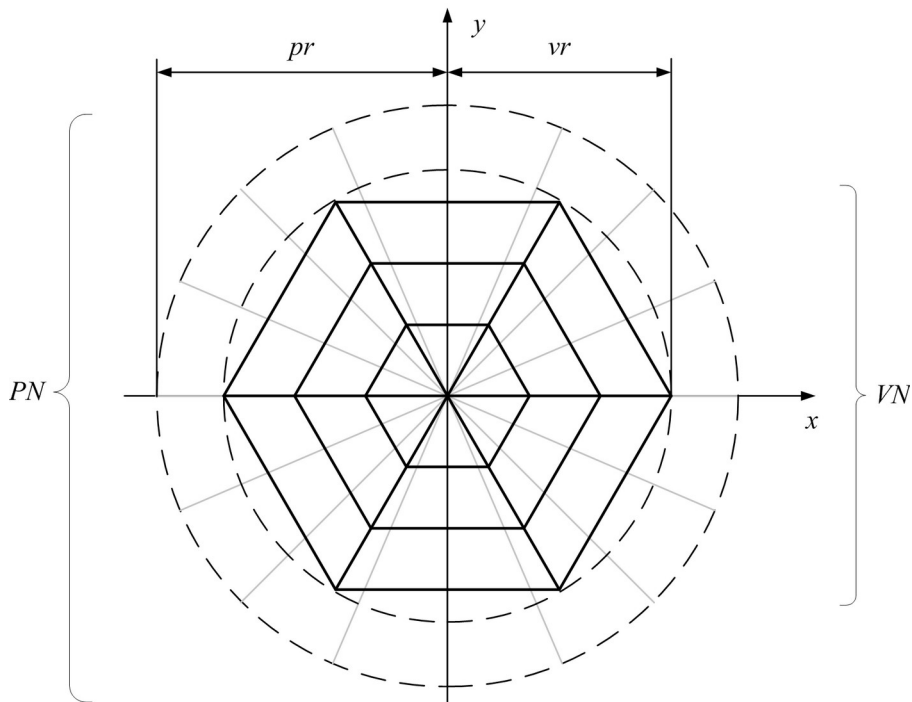


Рисунок 2 - Модель антенны *Monocone*, вид сверху  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.2>

Параметры вертикалов:  $VN$  – количество вертикалов;  $vr$  – радиус окружности, несущей точки соединения вертикалов и радиалов (радиус монополя), м;  $vh$  – высота точек соединения вертикалов и радиалов, м;  $vwr$  – радиус проводов вертикалов, м.

$HN$  – количество горизонталов;  $CN$  – количество колец. Кольца и горизонталы равномерно распределены вдоль образующей соответственно верхнего и нижнего конусов. Диаметр проводников колец, горизонталов и радиалов полагается равным диаметру проводников вертикалов.

Параметры противовесов:  $PN$  – количество противовесов;  $pr$  – радиус противовесов, м;  $ph$  – высота точки подключения противовесов, м;  $pl$  – высота свободных концов противовесов, м;  $pwr$  – радиус проводников противовесов, м.

Электрофизические параметры:  $\sigma_w$  – проводимость проводников антенны, См/м;  $\sigma_g$  – проводимость подстилающего грунта, См/м;  $\epsilon_g$  – относительная диэлектрическая проницаемость грунта.

По известным исходным параметрам могут быть вычислены следующие характеристики антенны:  $WN$  – общее количество проводников в модели,  $L_w$  – общая протяженность проводников,  $L_v$  – протяженность подвешенных проводников (т.е., сегмента питания, мачты, вертикалов, горизонталов, радиалов и колец),  $L_p$  – протяженность противовесов.

В качестве иллюстрации на рисунке 3 приведена модель антенны со следующими геометрическими параметрами:  $h = 30$  м;  $d = 0.15$  м;  $VN = 8$ ;  $vr = 14$ ;  $vh = 22$  м;  $vwr = 0.001$  м;  $HN = 2$ ;  $CN = 3$ ;  $PN = 32$ ;  $pr = 12$  м;  $ph = 0.5$  м;  $pl = 0.05$  м. При этом  $L_w = 1004.2$  м,  $L_v = 619.9$  м,  $L_p = 384.3$  м.

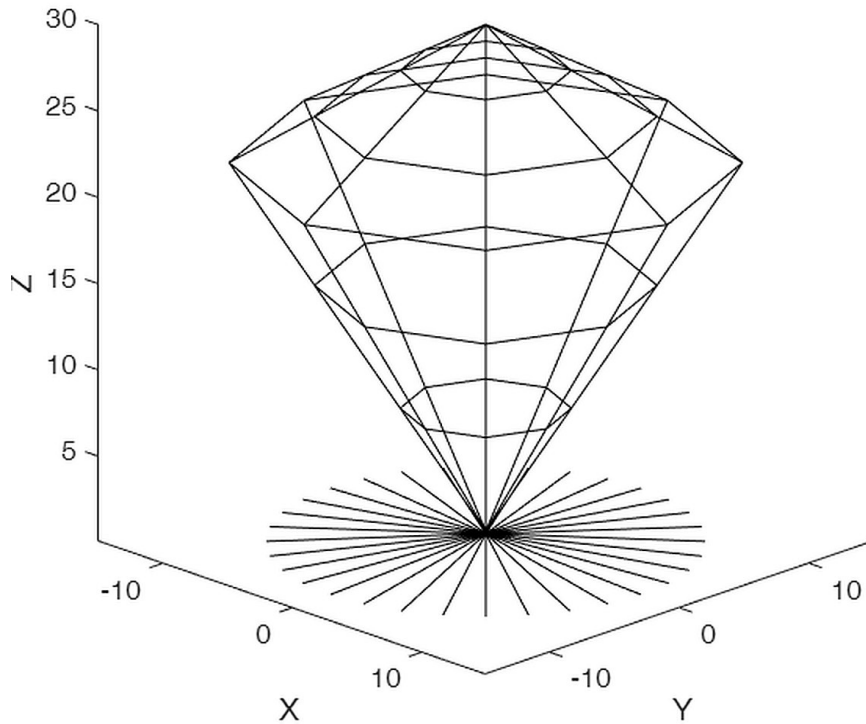


Рисунок 3 - Модель антенны Monocone  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.3>

Для расчета электрических характеристик модели с помощью метода моментов необходимо, чтобы проводники не пересекались, а образовывали сетку. В таком случае, например, для модели, приведенной на рисунке 3, каждый из вертикалов должен состоять из трех отрезков, включенных один за другим в линию, каждое кольцо – из восьми, и т. д. При этом общее количество элементов составит  $WN = 122$ .

Для построения полной электродинамической модели найдем положение вершин всех проводников модели. Координаты представим в виде  $(P_1, P_2) = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$ , где точка  $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$  – начало проводника,  $P_2 = (x_2, y_2, z_2)$  – его конец.

Нумерация вертикалов принята по часовой стрелке, смотря с положительного направления оси  $z$ :  $vn = 1 \dots VN$ , вертикал с номером  $vn = 1$  лежит в плоскости  $xOz$ . Угол поворота  $vn$ -го вертикала вокруг оси  $z$  определяется как  $\alpha_{vn} = 2\pi(vn-1) / VN$ ,  $vn = 1 \dots VN$ . Аналогичным образом пронумерованы противовесы,  $pn = 1 \dots PN$ . Угол поворота  $pn$ -го противовеса вокруг оси  $z$ :  $\alpha_{pn} = 2\pi(pn-1) / PN$ ,  $pn = 1 \dots PN$ . Кольца нумеруются от периферии к центру антенны:  $cn = 1 \dots CN$ . Горизонталы нумеруются от нижней точки сборки вертикалов  $D$  в направлении соединения с радиалами:  $hn = 1 \dots HN$ .

Координаты основных точек модели:  $O = (0, 0, 0)$ ;  $P = (0, 0, ph)$ ;  $D = (0, 0, d + ph)$ ;  $H = (0, 0, h)$ . Центральная мачта и сегмент питания определяются своими вершинами:  $(P, D)$  и  $(D, H)$ , соответственно. Противовесы (рисунок 4), от точки сборки  $P$  до внешних концов:  $(P, pr \cos \alpha_{pn}, pr \sin \alpha_{pn}, pl)$ .

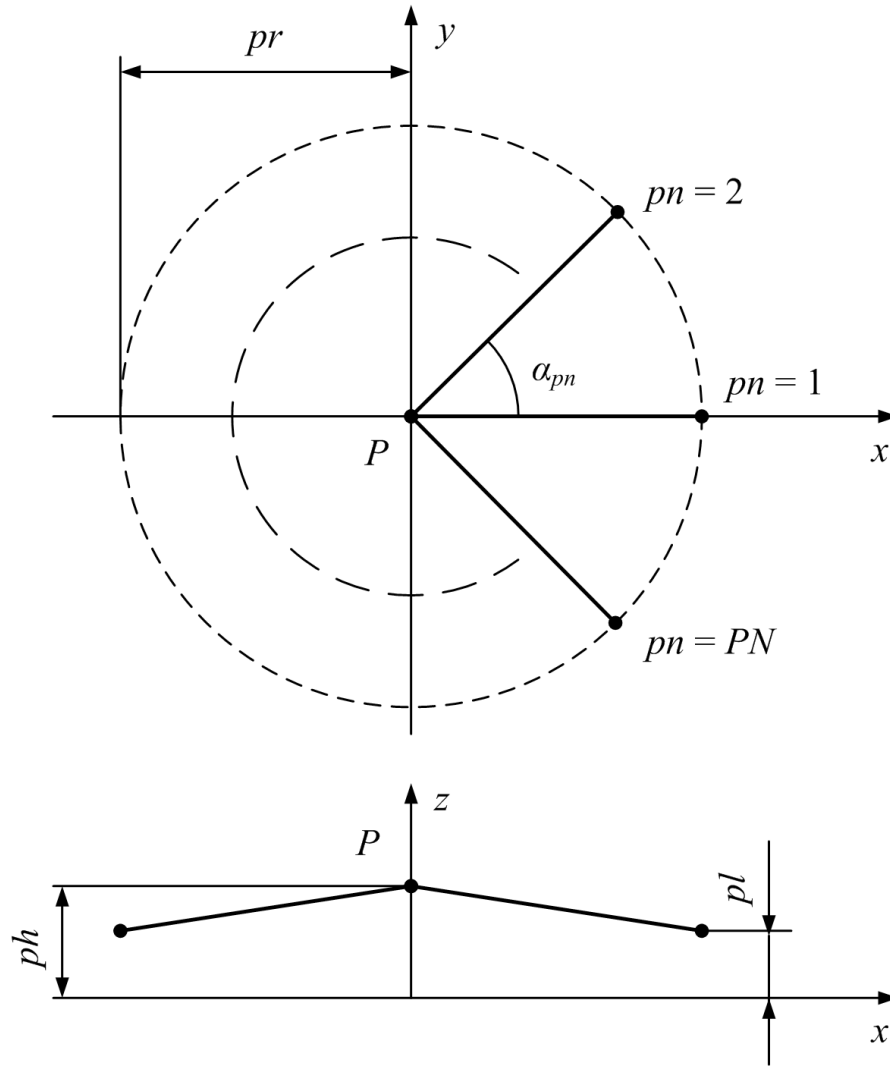


Рисунок 4 - Координаты противовесов  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.4>

Точки соединения вертикалов и горизонталов  $V_{vn, hn}$  разделяют вертикалы по длине на равное количество частей  $HN + 1$  (рисунки 5, 6). Для определения координат данных точек может быть получено следующее выражение [8]:  $V_{vn, hn} = (r_{hn} \cos \alpha_{vn}, r_{hn} \sin \alpha_{vn}, z_1(1-t_{hn}) + z_2 t_{hn})$ , где  $r_{hn} = x_1(1-t_{hn}) + x_2 t_{hn}$ ,  $t_{hn} = t hn$ ,  $x_1 = D_x$ ,  $z_1 = D_z$ ,  $x_2 = vr$ ,  $z_2 = vh$ ,  $vn = 1 \dots VN$ ,  $hn = 1 \dots HN + 1$ .

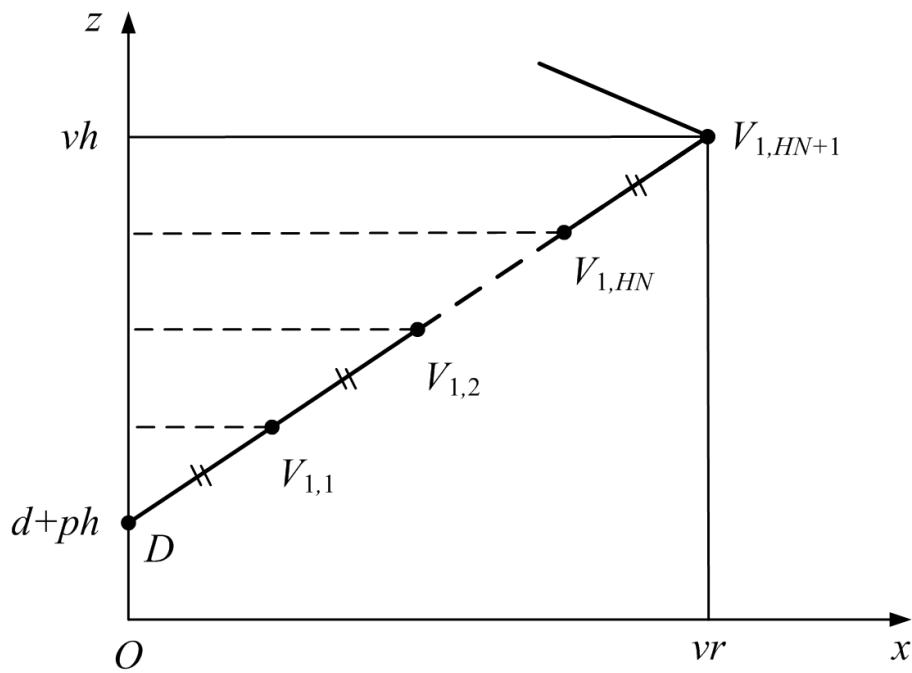


Рисунок 5 - Точки соединения вертикалов и горизонталов, вид сбоку  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.5>

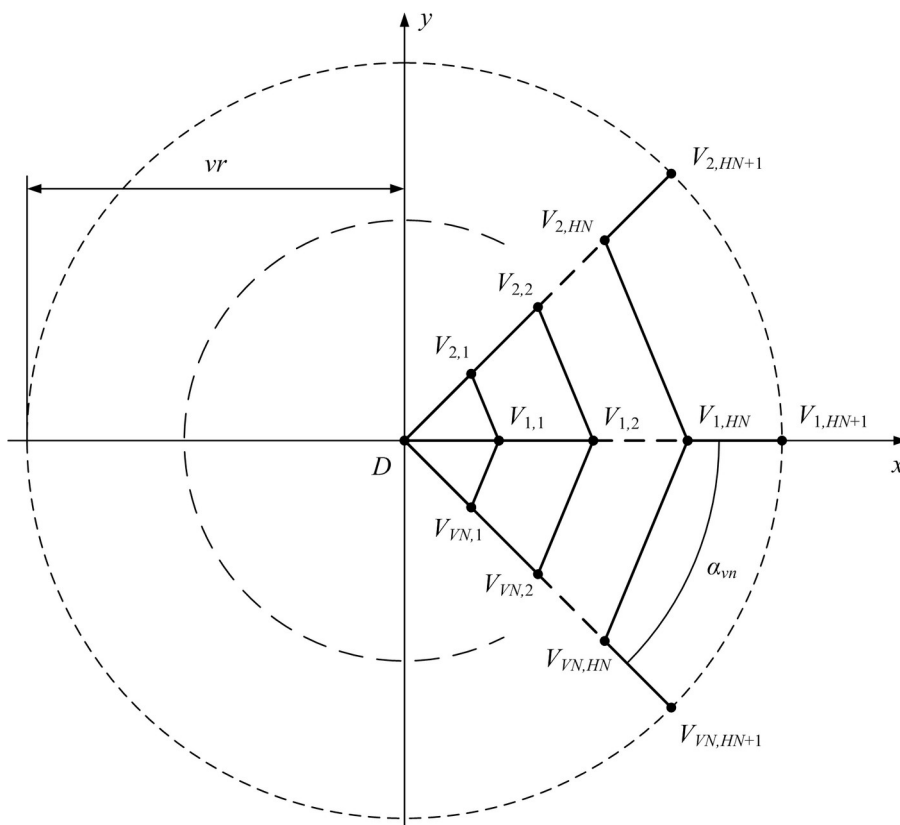


Рисунок 6 - Точки соединения вертикалов и горизонталов, вид сверху  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.6>

Вертикалы образованы включенными один за другим в линию проводниками  $(D, V_{vn, 1}), (V_{vn, hn-1}, V_{vn, hn}), vn = 1...VN, hn = 2...HN+1$ . Горизонталы образованы включенными в кольцо проводниками  $(V_{vn, hn}, V_{vn+1, hn}), (V_{VN, hn}, V_{1, hn}), vn = 1...VN-1, hn = 1...HN$ .

Координаты точек соединения радиалов и колец при  $CN > 0$  определяются аналогично точкам соединения вертикалов и горизонталов, рисунки 7, 8:  $C_{vn, cn} = (r_{cn} \cos \alpha_{vn}, r_{cn} \sin \alpha_{vn}, z_1(1-t_{cn}) + z_2 t_{cn})$ ,  $r_{cn} = x_1(1-t_{cn}) + x_2 t_{cn}$ ,  $t_{cn} = t(cn-1)$ ,  $t = 1/CN$ ,  $x_1 = vr$ ,  $z_1 = vh$ ,  $x_2 = H_x$ ,  $z_2 = H_z$ ,  $vn = 1 \dots VN$ ,  $cn = 1 \dots CN$ .

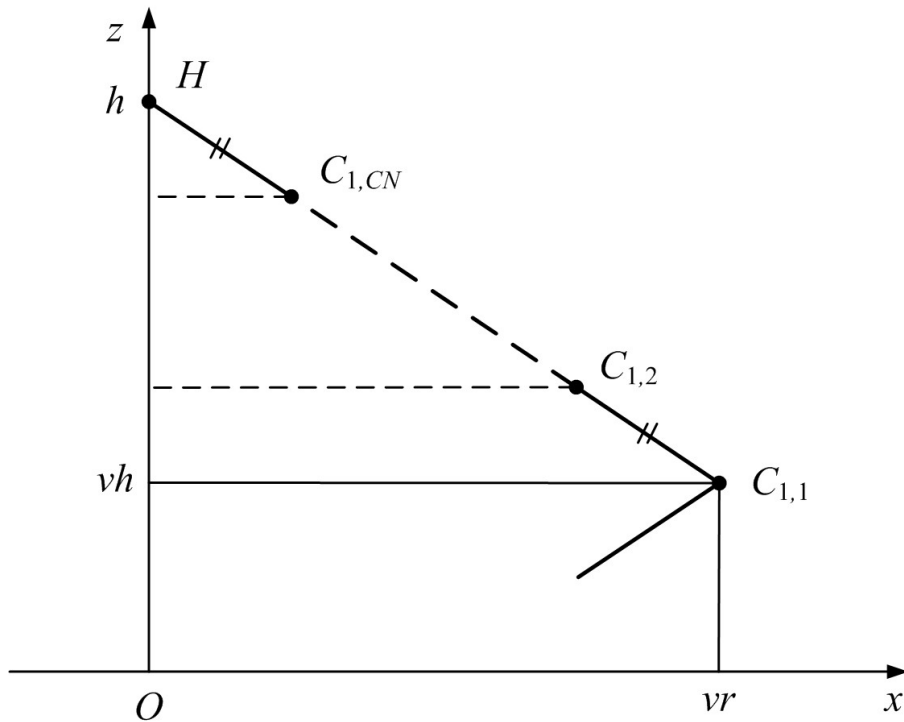


Рисунок 7 - Точки соединения радиалов и колец, вид сбоку  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.7>

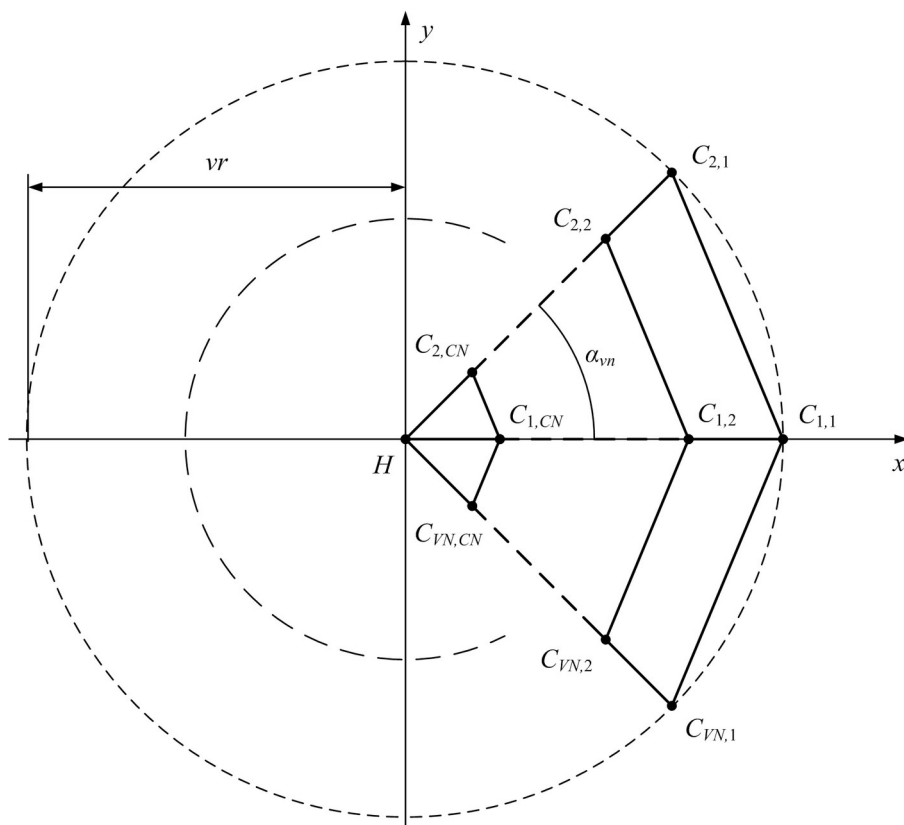


Рисунок 8 - Точки соединения радиалов и колец, вид сверху  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.8>

Радиалы при  $CN > 0$  образованы включенными один за другим в линию проводниками  $(C_{vn, cn}, C_{vn, cn+1}), (C_{vn, CN}, H)$ ,  $vn = 1 \dots VN$ ,  $cn = 1 \dots CN - 1$ . При  $CN = 0$  радиал состоит из одного проводника от верхней точки соответствующего вертикала до вершины антенны:  $(V_{vn, HN+1}, H)$ ,  $vn = 1 \dots VN$ .

Координаты колец:  $(C_{vn, cn}, C_{vn+1, cn}), (C_{VN, cn}, C_{1, cn})$ ,  $vn = 1 \dots VN-1$ ,  $cn = 1 \dots CN$ .

Общее количество проводников в модели составляет  $WN = VN (2HN + CN + 1) + RN + PN + 2$ . Здесь  $RN$  – количество радиалов, при этом  $RN = VN$  при  $CN = 0$  и  $RN = CN \cdot VN$  при  $CN > 0$ .

Для автоматического синтеза модели антенны в среде MATLAB разработана программа MMD (рисунок 9), обеспечивающая расчет координат проводников в соответствии с введенными исходными данными, и экспорт полученной модели в файлы NEC и FEKO.

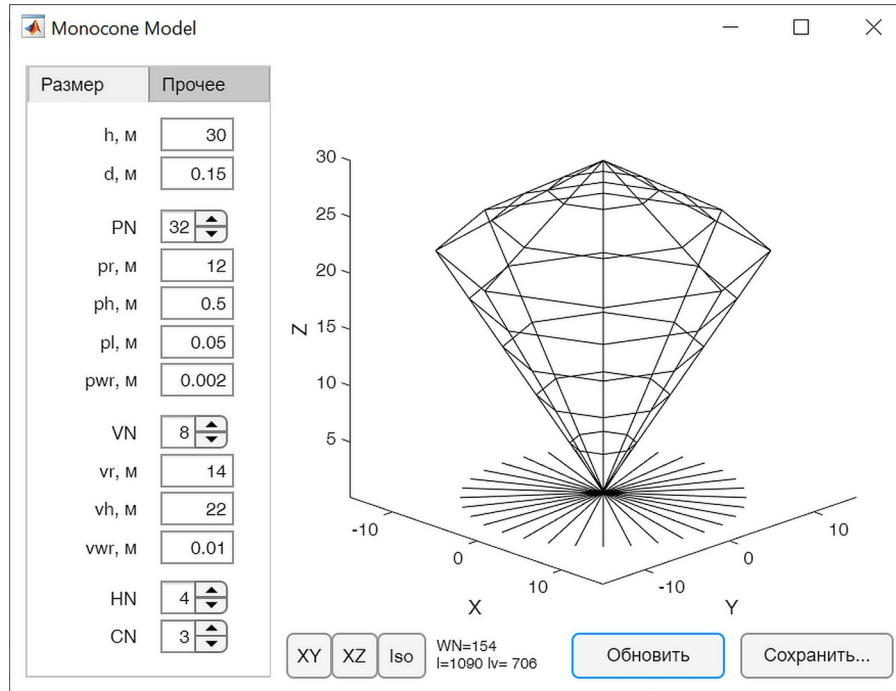


Рисунок 9 - Интерфейс программы MMD  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.9>

### Основные результаты

Целью исследований является поиск антенны с наименьшей добротностью, вычисленной в пределах рабочей полосы частот, что должно дать наилучшую степень согласования с фидерным трактом при использовании согласующих цепей.

Основные параметры антенны заданы в соответствии с техническими ограничениями изготовления конструкции антенны и составляют: высота монополя  $h = 22$  м, радиус противовесов  $pr = 12$  м, радиус монополя  $vr = 14$  м, высота точки подключения противовесов  $ph = pl = 0.326$  м, длина сегмента питания  $d = 0.15$  м. Количество противовесов  $PN = 32$ , радиусы проводников  $vwr = 1$  мм и  $pwr = 1$  мм.

Предыдущие исследования, результаты которых приведены в [9], показывают, что наименьшей добротностью обладает модель антенны с  $vh = h$ . Также показано, что увеличение количества вертикалов более  $VN = 16$  не имеет смысла. Дальнейшее рассмотрение направлено на определение оптимального количества остальных элементов антенны.

Моделирование проведено с помощью системы NEC-2D [10], в среде GNEC [11] для «средних» параметров земли:  $\epsilon_g = 13$ ,  $\sigma = 0.005$  См/м.

Ниже рассмотрены результаты расчетов входного сопротивления и КСВ антенны при различном количестве вертикалов  $VN$ , горизонталов  $HN$  и колец  $CN$ . Характерные примеры соответствующих моделей показаны на рисунках 10-14.



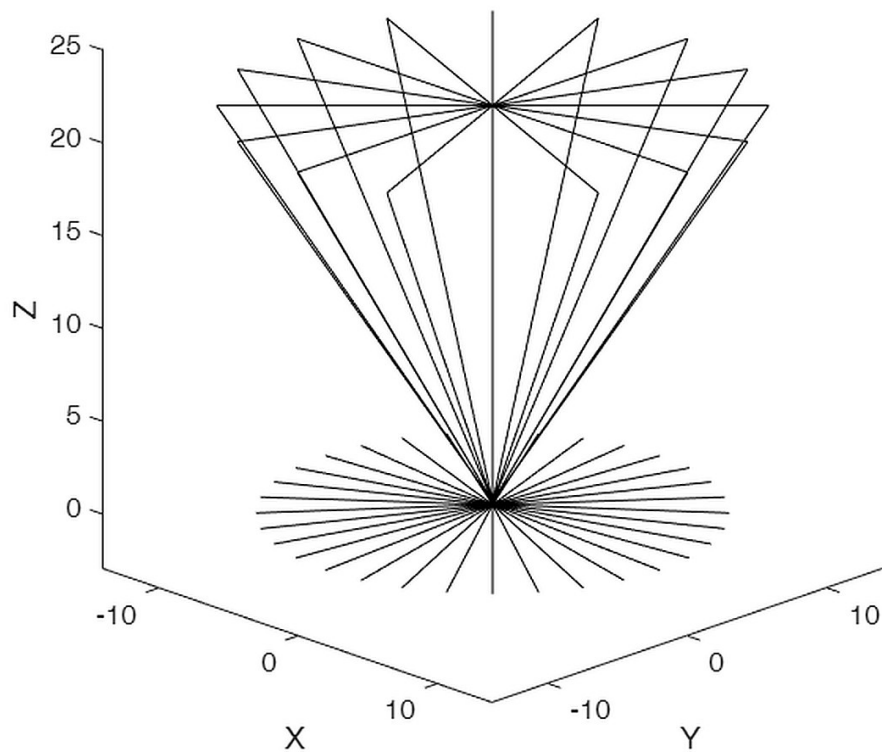


Рисунок 10 - Модель антенны для  $VN = 16, HN = 0, CN = 0$   
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.10>

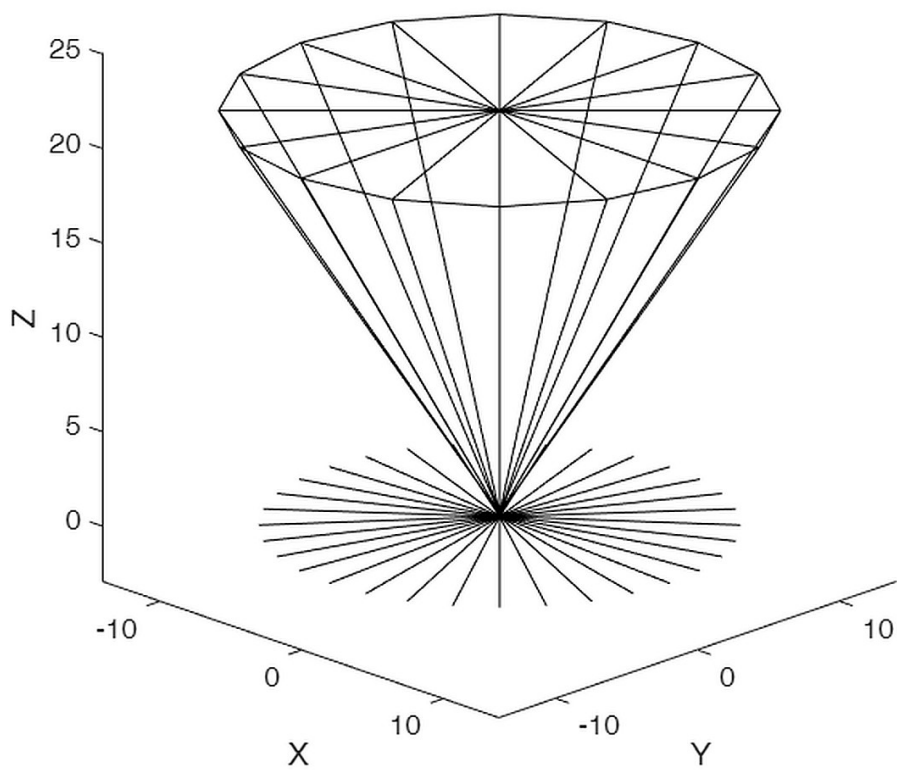


Рисунок 11 - Модель антенны для  $VN = 16, HN = 0, CN = 1$   
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.11>

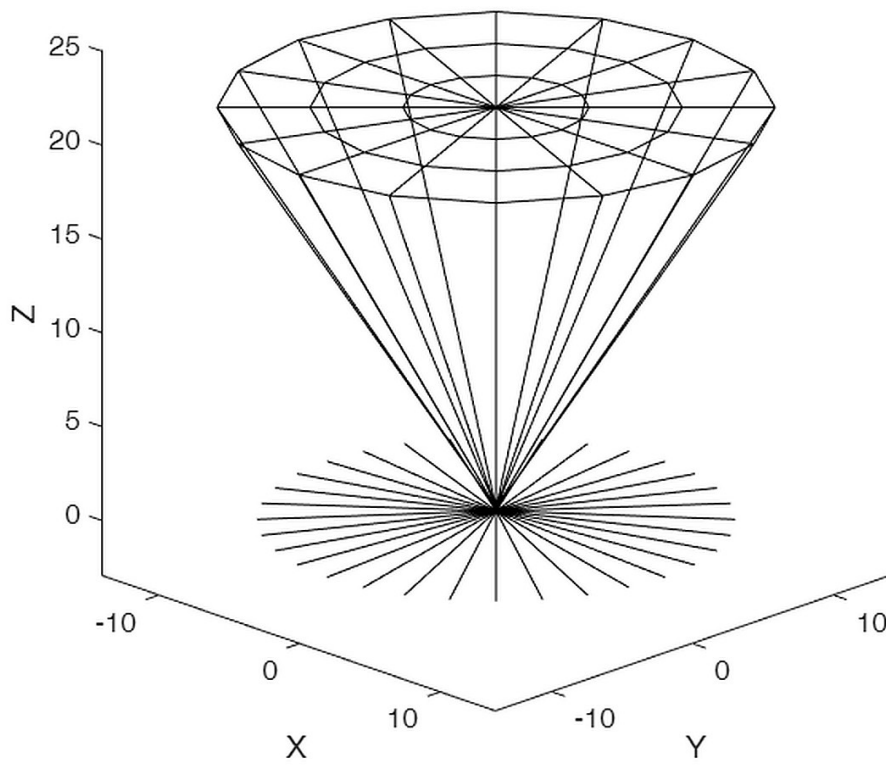


Рисунок 12 - Модель антенны для  $VN = 16$ ,  $HN = 0$ ,  $CN = 3$   
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.12>

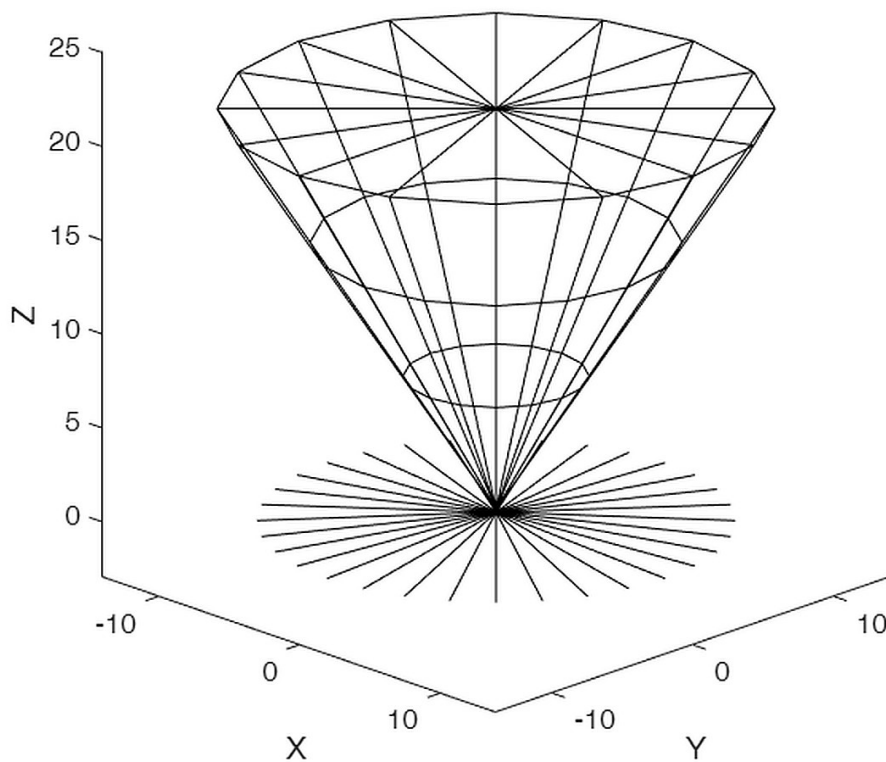


Рисунок 13 - Модель антенны для  $VN = 16$ ,  $HN = 2$ ,  $CN = 1$   
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.13>

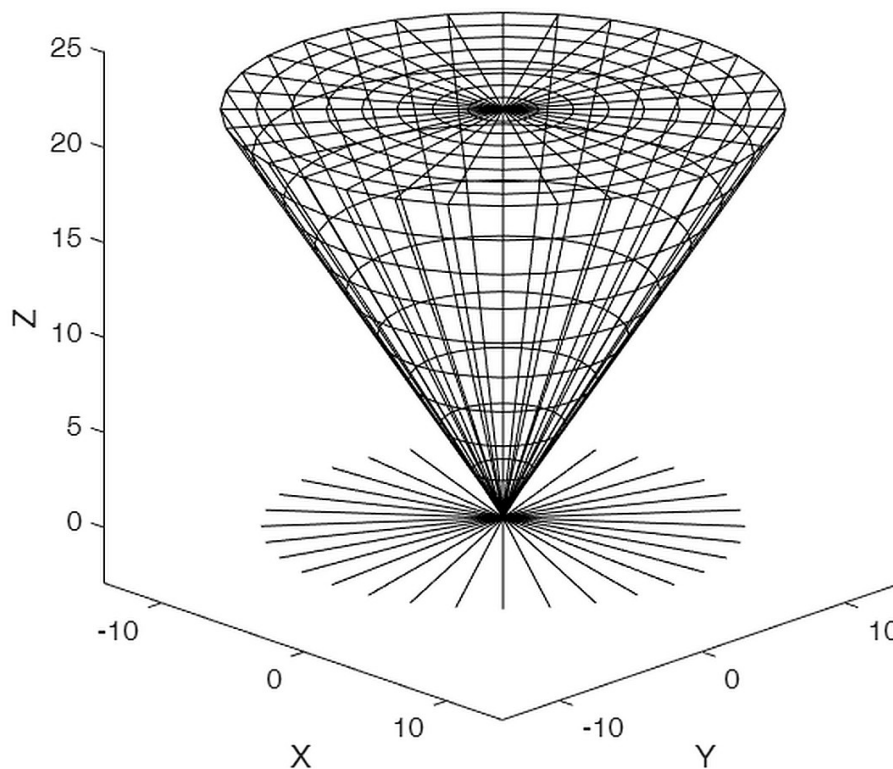


Рисунок 14 - Модель антенны для  $VN = 32$ ,  $HN = 8$ ,  $CN = 8$   
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.14>

В первую очередь рассмотрим влияние количества колец  $CN$ . На рисунке 15 показан КСВ для моделей антенны с различным  $CN$ . Как видно, добавление первого кольца, соединяющего верхние точки вертикалов, снижает по частоте полосу согласования примерно на 150 кГц, и упрощает впоследствии построение согласующей цепи. К сожалению, дальнейшее увеличение количества колец практически не изменяет ситуацию.

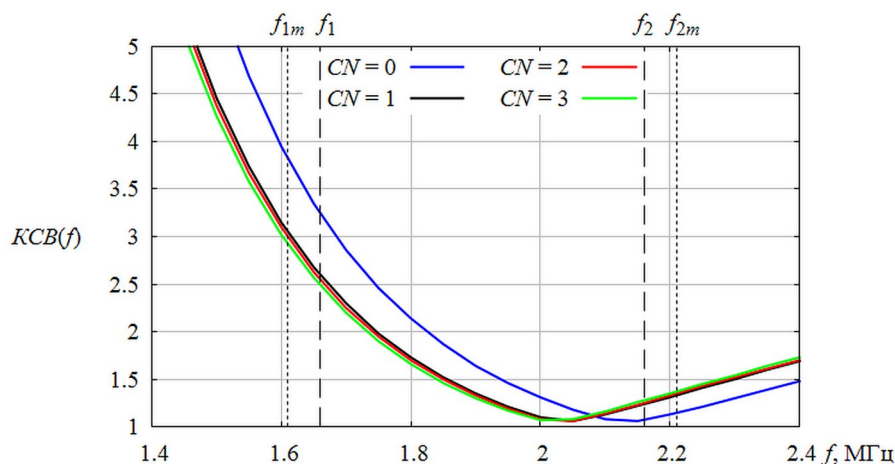


Рисунок 15 - КСВН моделей антенны при различном количестве колец,  $VN = 16$ ,  $HN = 0$   
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.15>

Проведем попытку улучшения согласования с помощью добавления горизонталов к модели с  $CN = 1$ . Результаты расчета показаны на рисунке 16. Как видно, количество горизонталов и вообще их наличие практически не изменяет КСВ антенны.

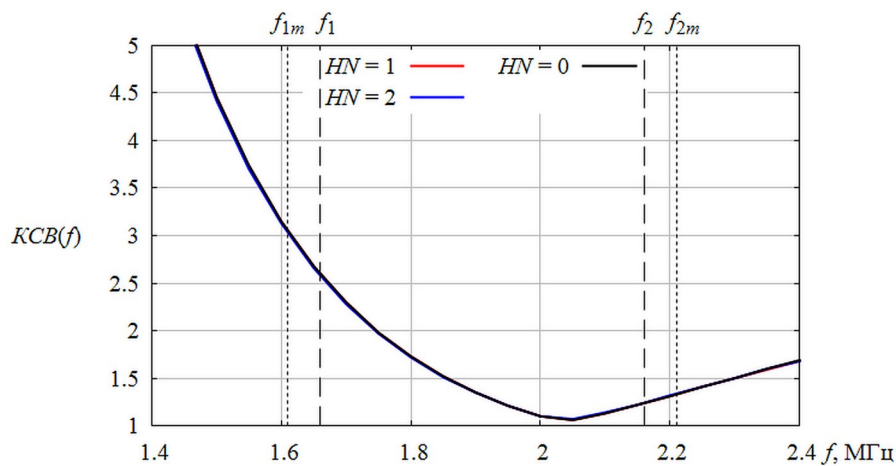


Рисунок 16 - КСВН моделей антенны при различном количестве горизонталов,  $VN = 16$ ,  $CN = 1$   
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.16>

Дополнительно были рассмотрены некоторые «предельные» конструкции антенны с большим количеством элементов в сравнении с найденным выше наилучшим вариантом  $VN = 16$ ,  $CN = 1$ ,  $HN = 0$ , рисунок 17. Однако, эти конструкции не демонстрируют значимого для практики улучшения.

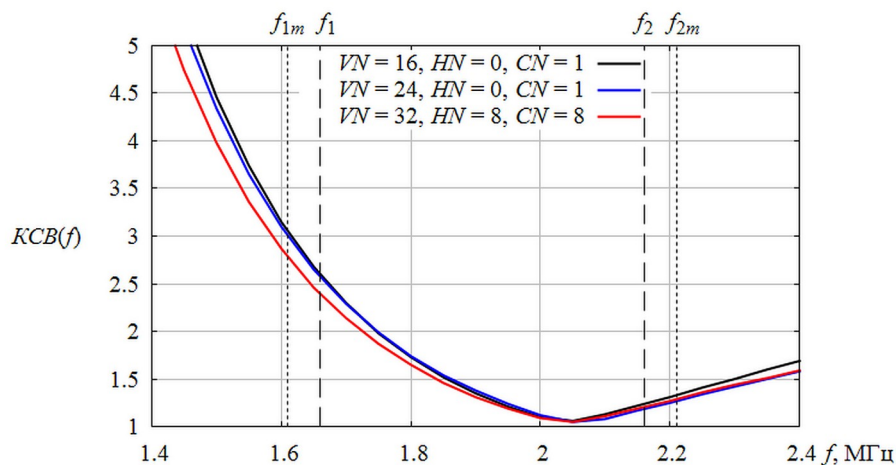


Рисунок 17 - КСВН «предельных» моделей антенны  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.46.17>

### Заключение

В ходе проведенной работы были разработаны математическая и электродинамическая модель антенны типа *Мопосоне*. Проведен расчет характеристик моделей с различным количеством элементов антенны. Показано, что при сохранении заданных габаритных размеров наилучшей с точки зрения согласования является модель антенны с параметрами  $VN = 16$ ,  $HN = 0$ ,  $CN = 1$ . Электрическое соединение верхних точек вертикалов одним кольцом весьма желательно с точки зрения улучшения согласования. Наличие горизонталов и увеличение количества колец практически не влияет на электрические характеристики антенны.

Для подтверждения полученных расчетных результатов в ходе дальнейших исследований предполагается разработка, изготовление и измерение характеристик масштабного макета антенны, полученного путем переноса модели по принципу электродинамического подобия на более высокую частоту.

**Финансирование**

Работа выполнена при поддержке КГАУ "Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности", проект 2022030108251.

**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 reported study was funded by Krasnoyarsk regional science foundation, project no. 2022030108251.

**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. Schelkunoff S.A. Theory of Antennas of Arbitrary Size and Shape / S.A. Schelkunoff // Proceedings of the IRE. - Vol. 29. - № 9. - P. 493-521. - DOI: 10.1109/JRPROC.1941.231669.
2. Schelkunoff S.A. General theory of symmetric antennas / S.A. Schelkunoff // J. Appl. Phys. - Vol. 22. - P. 1330-1332.
3. Givati O. Analysis of skeletal wire conical antennas / O. Givati, A.P.C. Fourie // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - Vol. 44. - № 6. - P. 844-858. - DOI: 10.1109/8.509888.
4. Wang Q. Study on the broadband properties of a wire conical monopole antenna / Q. Wang, C. Ruan, Q. He // ICMMT 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. - 2004. - P. 43-45. - DOI: 10.1109/ICMMT.2004.1411455.
5. Guo J. Conical monopole antennas on finite ground planes / J. Guo, Q. Liu, B. Zhou. // ICMMT 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. - 2004. - P. 16-18. - DOI: 10.1109/ICMMT.2004.1411448.
6. Zhang An X.L. optimum design of low-profile ultra-wideband HF skeletal wire duoconical monopole antenna with parasitic grounded poles / X.L. Zhang, H.T. Gao, Q.C. Zhang // 2016 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). - 2016. - P. 264-267. - DOI: 10.1109/APWC.2016.7738173.
7. McDonald J.L. On the Bandwidth of Monocone Antennas / J.L. McDonald, D.S. Filipovic // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - Vol. 56. - № 4. - P. 1196-1201. - DOI: 10.1109/TAP.2008.919226.
8. Ильин В.А. Аналитическая геометрия / В.А. Ильин, Э.Г. Позняк. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 224 с.
9. Панько В.С. Оптимизация формы антенны в виде конического монополя / В.С. Панько, Ю.П. Саломатов, А.А. Баскова // Современные проблемы радиоэлектроники. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2022.
10. Burke G.J. Numerical Electromagnetics Code (NEC)-method of moments / G.J. Burke, A.J. Poggio. - Lawrence Livermore Lab, 1981.
11. GNEC V1.6. Upgrade Manual. - Nittany Scientific, Inc. 2003.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Schelkunoff S.A. Theory of Antennas of Arbitrary Size and Shape / S.A. Schelkunoff // Proceedings of the IRE. - Vol. 29. - № 9. - P. 493-521. - DOI: 10.1109/JRPROC.1941.231669.
2. Schelkunoff S.A. General theory of symmetric antennas / S.A. Schelkunoff // J. Appl. Phys. - Vol. 22. - P. 1330-1332.
3. Givati O. Analysis of skeletal wire conical antennas / O. Givati, A.P.C. Fourie // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - Vol. 44. - № 6. - P. 844-858. - DOI: 10.1109/8.509888.
4. Wang Q. Study on the broadband properties of a wire conical monopole antenna / Q. Wang, C. Ruan, Q. He // ICMMT 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. - 2004. - P. 43-45. - DOI: 10.1109/ICMMT.2004.1411455.
5. Guo J. Conical monopole antennas on finite ground planes / J. Guo, Q. Liu, B. Zhou. // ICMMT 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. - 2004. - P. 16-18. - DOI: 10.1109/ICMMT.2004.1411448.
6. Zhang An X.L. optimum design of low-profile ultra-wideband HF skeletal wire duoconical monopole antenna with parasitic grounded poles / X.L. Zhang, H.T. Gao, Q.C. Zhang // 2016 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). - 2016. - P. 264-267. - DOI: 10.1109/APWC.2016.7738173.
7. McDonald J.L. On the Bandwidth of Monocone Antennas / J.L. McDonald, D.S. Filipovic // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - Vol. 56. - № 4. - P. 1196-1201. - DOI: 10.1109/TAP.2008.919226.
8. Il'in V.A. Analiticheskaya geometriya [Analytic Geometry] / V.A. Il'in, E.G. Poznyak. - M. : FIZMATLIT, 2004. - 224 p. [in Russian]
9. Pan'ko V.S. Optimizatsiya formy anteny v vide konicheskogo monopolya [Optimization of the Conical Monopole Antenna Form] / V.S. Pan'ko, Yu.P. Salomatov, A.A. Baskova // Sovremennyye problemy radioelektroniki [Modern Problems of Radioelectronics]. – Krasnoyarsk : Siberian Federal Univ., 2022. [in Russian]
10. Burke G.J. Numerical Electromagnetics Code (NEC)-method of moments / G.J. Burke, A.J. Poggio. - Lawrence Livermore Lab, 1981.
11. GNEC V1.6. Upgrade Manual. - Nittany Scientific, Inc. 2003.