

# Печатная пеленгационная антенная система на основе дипольного излучателя с центрально-концевым питанием

А.А. Колесников

Новосибирский государственный технический университет

**Аннотация:** В данной работе рассматриваются вопросы проектирования печатных антенных систем с разностной диаграммой направленности. Приведены выражения для описания входного импеданса уединенного дипольного излучателя с центрально-концевым питанием. Представлены результаты полномасштабного электродинамического моделирования и экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** печатная антенна, входной импеданс, разностная диаграмма направленности, дипольный излучатель, центрально-концевое питание

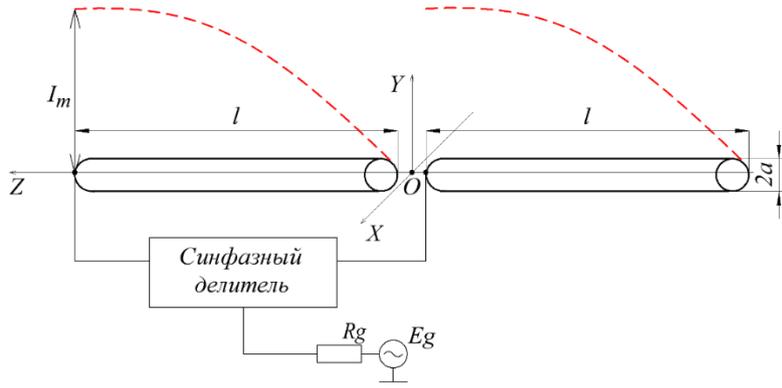
## 1. Введение

Совершенствование существующих и разработка новых радиолокационных и радионавигационных систем различного назначения предполагает возрастание требований, предъявляемых к ним в отношении габаритов, массы и надежности. Также наблюдается необходимость повышения уровня производственной надежности и эксплуатационной технологичности. В связи с этим, актуальной остается задача разработки различных компактных и технологичных печатных антенных систем, в том числе, формирующих разностную диаграмму направленности с ярко выраженным минимумом.

Предлагаемая антенная система может быть использована для определения направления на пеленгуемый объект по разностной диаграмме направленности, близкий к нулю минимум которой лежит на одной прямой, соединяющей радиолокатор с пеленгуемым объектом. Известны работы отечественных [1-4] и зарубежных авторов [5-8], посвященных разработке как одиночных антенн, так и антенных систем, предназначенных для пеленгации. Особенностью же предлагаемой антенной системы является излучатель, выполненный на основе печатного дипольного излучателя с центрально-концевым питанием, предложенный в работе [9]. Дипольный излучатель с центрально-концевым питанием, по сравнению с классическим диполем, не требует использование какого-либо симметрирующего устройства. и может быть запитан напрямую с выходов синфазного равноамплитудного делителя мощности, что в свою очередь повышает компактность и технологичность антенной системы в целом.

## 2. Собственный входной импеданс одиночного дипольного излучателя с центрально-концевым питанием

Дипольный излучатель с центрально-концевым питанием образован двумя коллинеарными цилиндрическими проводниками с радиусом  $a$  и длиной  $l$ , смежные концы которых находятся в непосредственной близости, питание антенны осуществляется путем подключения клемм генератора к дальнему концу левого плеча и ближнему концу правого плеча излучателя, эскизная схема излучателя приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Излучатель дипольного вида с центрально – концевым питанием и распределение тока в нем при  $l = \lambda / 4$ .

Входной импеданс излучателя определим, используя метод наводимых электродвижущих сил, который является классическим методом вычисления собственных и взаимных импедансов [10-11]. Воспользовавшись процедурой, описанной в [10], получим выражение для входного импеданса дипольного излучателя с центрально-концевым питанием:

$$Z_m = -\frac{1}{I_m I_m^*} \int_{-l}^l E_z(a, z) I_z^*(z) dz = j30 \int_{-l}^0 [\sin(k|z|)] \{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4\} dz +$$

$$+ j30 \int_0^l [\sin(k[l-z])] \{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4\} dz = R_m + jX_m; Z_{in} = Z_m / \sin^2(kl). \quad (1)$$

где:

$$Z_1 = \left[ -\sin(kl) (1 + jkR_2) \frac{(z+l) e^{-jkR_2}}{kR_2^2 R_2} \right]; Z_2 = \left[ -\cos(kl) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} + \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} \right];$$

$$Z_3 = \left[ -\sin(kl) (1 + jkR_0) \frac{z e^{-jkR_0}}{kR_0^2 R_0} \right]; Z_4 = \left[ -\cos(kl) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} + \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \right],$$

$$R_1 = \sqrt{a^2 + (z-l)^2}, R_2 = \sqrt{a^2 + (z+l)^2}, R_0 = \sqrt{a^2 + z^2}.$$

### 3. Моделирование антенной системы

Распределение тока в уединенном дипольном излучателе с центрально-концевым питанием является несимметричным, т.е. токи в плечах излучателя сонаправлены. Это свойство находит свое отражение при вопросе построения линейных антенных решеток из таких излучателей. Важно учитывать, что электромагнитные поля от двух соседних излучателей, в результате взаимодействия могут как синфазно складываться, так и компенсировать друг друга. На данном принципе и основана работа представленной антенной системы, если предположить, что токи, текущие по соседним дипольным излучателям, будут равноамплитудными и противоположно направленными, то будет наблюдаться компенсация их электромагнитных полей в дальней зоне Фраунгофера. При этом в плоскости электрического вектора E диаграмма направленности будет иметь ярко выраженный минимум и характеризоваться двухвершинной формой. Несмотря на формирование минимума в диаграмме направленности, согласование антенной системы с генератором будет сохраняться, так как минимум будет обусловлен не эффектами отражения высокочастотных токов от

элементов печатной топологии, а взаимной компенсацией излучённых половинами электромагнитных полей в точках дальней зоны Фраунгофера. Иными словами, в топологии антенной системы отсутствуют какие-либо фрагменты, обладающие полосно-заграждающими свойствами, за счёт чего и наблюдался бы значительный уровень отражений высокочастотных токов обратно к источнику сигнала, подключённого к входу.

В качестве примера приведем расчет антенной системы на рабочей частоте 3 ГГц:

$$f_0 = 3 \text{ ГГц.}$$

В качестве диэлектрической подложки выберем материал FR-4 со следующими характеристиками:

$$\varepsilon_r = 4,3; \tan(\delta) = 0,025; h = 1 \text{ мм.}$$

Длина  $l_{\text{ЦКП}}$  и ширина  $w_{\text{ЦКП}}$  плеча печатного излучателя исходя из условия компенсации реактивной части входного импеданса, согласно выражению (1), будет равна:

$$l_{\text{ЦКП}} = 0,4516 \cdot \lambda_g = 0,4516 \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_r}} = 0,4516 \cdot \frac{c}{f_0 \sqrt{\varepsilon_r}} = 21,6 \text{ мм,}$$

$$w_{\text{ЦКП}} = 4 \cdot a = 4 \cdot 0,01 \cdot \lambda_g = 4 \cdot 0,01 \cdot \frac{c}{f_0 \sqrt{\varepsilon_r}} = 1,93 \text{ мм.}$$

Модель антенной системы, выполненной в САПР «CST Studio Suite», приведена на рисунке 2.

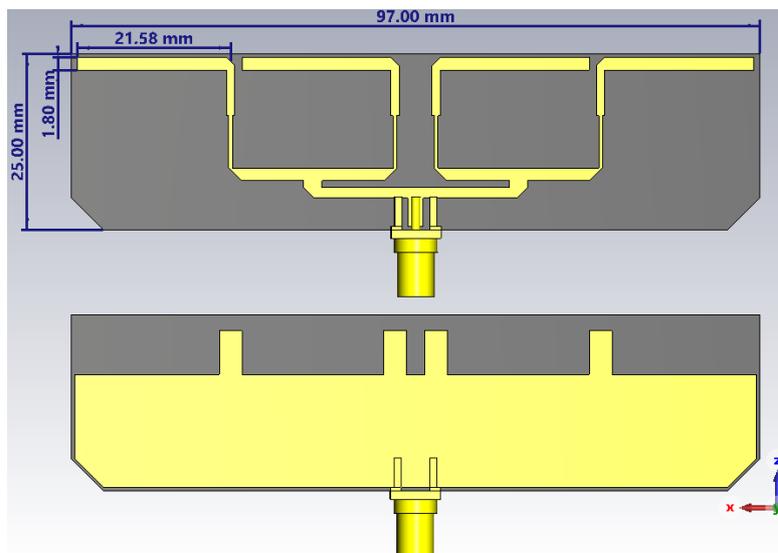
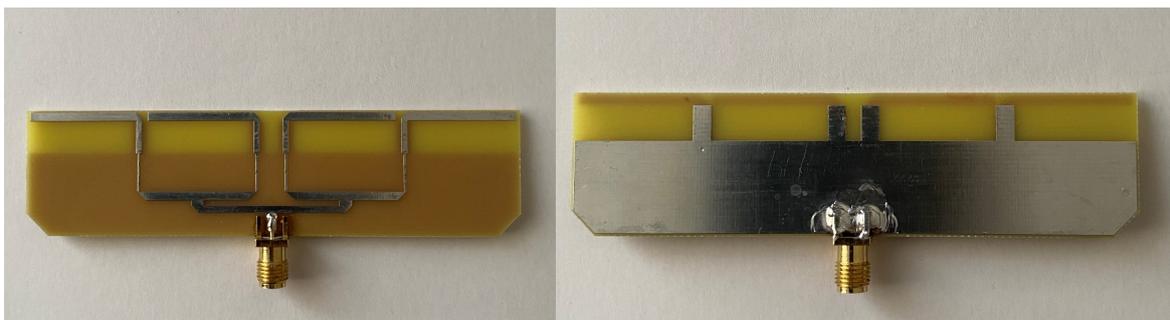


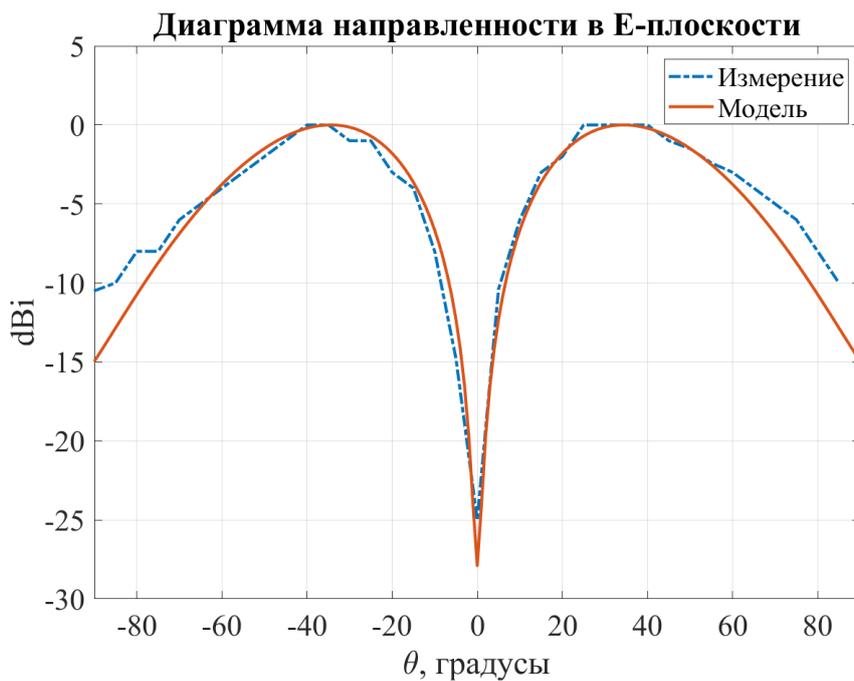
Рисунок 2. Антенная система, формирующая разностную диаграмму направленности.

#### 4. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

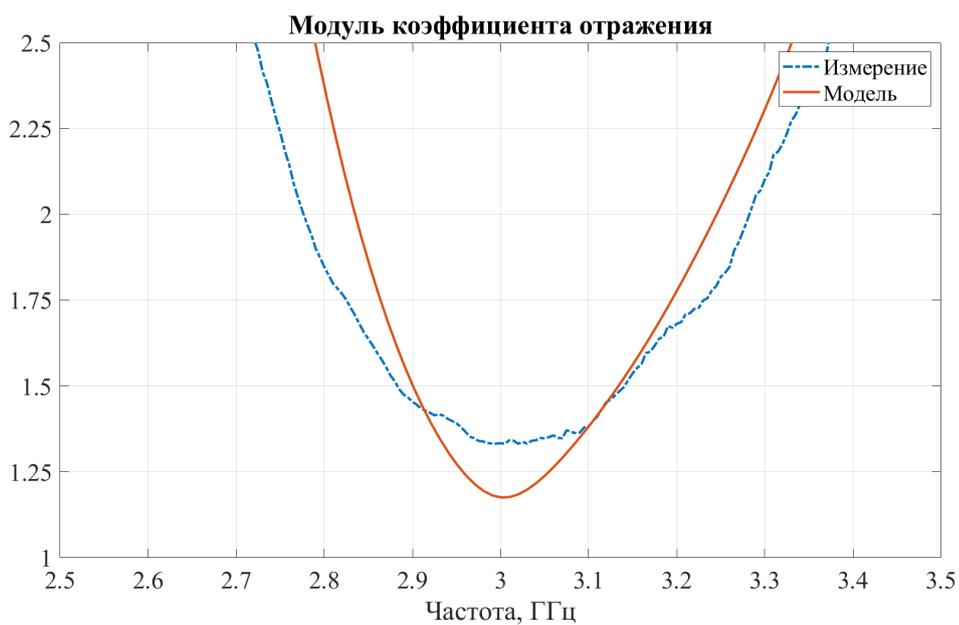
По результатам моделирования был реализован опытный макет печатной антенной системы и в лабораторных условиях были проведены экспериментальные измерения его характеристик. В качестве измерительного устройства использовался векторный анализатор цепей «RONDE&SCHWARZ ZVL 13» с диапазоном измерения от 9 кГц до 13.6 ГГц. На рисунке 3 представлены фотографии макета, а на рисунках 4, 5 представлены результаты моделирования и измерений.



**Рисунок 3.** Фотографии опытного макета.



**Рисунок 4.** Сечение ДН в плоскости электрического вектора E, результат моделирования (оранжевая сплошная линия) и измерение (синяя штриховая линия).



**Рисунок 5.** КСВН по входу, результат моделирования (оранжевая линия) и измерение (синяя линия).

### 3. Заключение

В работе приведены выражения для описания входного комплексного импеданса уединённого излучателя с центрально-концевым питанием и с их помощью реализована модель печатной антенной системы, формирующей разностную диаграмму направленности в плоскости электрического вектора  $E$ . По результатам моделирования был разработан и экспериментально исследован опытный макет антенны. Измеренная частотная характеристика опытного макета имеет высокую степень согласования с результатами моделирования, что говорит о корректности представленного подхода к проектированию. На основании полученных результатов можно сказать, что антенная система характеризуется рабочей полосой частот по уровню КВСН  $< 2$  порядка 16% от центральной частоты 3 ГГц, что является классическим для антенн дипольного типа. Следует также отметить, что сформированный нуль диаграммы направленности остается в постоянном положении (по нормали к излучающим проводникам) в широком диапазоне частот, но с ростом частоты уменьшается его глубина.

Исследование выполнено за счет **гранта Новосибирского государственного технического университета, грант № 0011-НСГ-22.**

#### Список литературы

1. S. A. Alekseytsev , D. A. Bukhtiyarov , A. P. Gorbachev & D. S. Vilimitsky (2020) The novel two-port hybrid ring dipole-like antenna with simultaneous sum and difference radiation patterns, *Electromagnetics*, 40:8, 554-562, DOI: 10.1080/02726343.2020.1838046.
2. Ю.А. Рембовский. Разработка и исследование антенной системы мобильного радиопеленгатора с повышенной чувствительностью и возможностью приема волн с произвольной поляризацией // *Антенны*. 2008. № 7–8 (134–135). С. 16–27.
3. Афонин, И. Л. Антенна с разностной диаграммой направленности для навигационных систем / И. Л. Афонин, М. Г. Неведров, В. Г. Слезкин // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. – 2020. – № 1-2. – С. 182-183. – EDN SPEZKO.
4. А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, Ю.А Рембовский. Амплитудно-фазовое пеленгование источников СВЧ-радиоизлучения с произвольной поляризацией с помощью кольцевой антенной решётки из ТЕМ рупоров и антенн Вивальди // *Антенны*. 2008. № 3 (130). С. 44–49.
5. D. C. Jenn, E.-H. Chua. 2003. Two-port hybrid ring dipole with simultaneous sum and difference element Patterns. *Electronics Letters* 39 (12):892–94. doi:10.1049/el:20030584.
6. S. -A. Malakooti, S. M. H. Mousavi and C. Fumeaux, "Tunable Bandpass-to-Bandstop Quasi-Yagi-Uda Antenna With Sum and Difference Radiation Patterns," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 4, pp. 2260-2271, April 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2891451.
7. S. -A. Malakooti and C. Fumeaux, "A Pattern Diversity Microstrip Antenna with Switchable Sum and Difference Beams in E - and H-plane," 2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Granada, Spain, 2019, pp. 0623-0625, doi: 10.1109/ICEAA.2019.8879313.
8. S. -A. Malakooti and C. Fumeaux, "Multi-element Vivaldi Antenna with Sum and Difference Radiation Patterns," 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Auckland, New Zealand, 2018, pp. 1-2, doi: 10.1109/APCAP.2018.8538280.
9. A. A. Kolesnikov, "Printed Antenna with Center-End Feed Dipole-Like Radiator," 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, pp. 1270-1273, doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017029.
10. C. A. Balanis, "Antenna theory. Analysis and design," 4th Edition. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, 2016. 1072 pages.
11. Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. Антенны: учебник для радиотехнических специальностей вузов – М.: Энергия, 1975. – 528 с.: ил.