

**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ КВ-АНТЕННЫ  
ТИПА ДЕЛЬТА МЕТОДОМ ОБЛЕТА  
С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА DJI MATRICE 100**

**В.Ю. Ермаков, В.П. Лебедев**

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
ermakvlad1986@mail.ru

**COMPARISON OF SIMULATION RESULTS WITH EXPERIMENT MEASUREMENT  
DIAGRAM DIRECTIVITY OF THE HF ANTENNA OF THE DELTA TYPE  
BY THE FLYBY METHOD INVOLVING UNMANNED AERIAL VEHICLE  
DJI MATRICE 10**

**V.Yu. Ermakov, V.P. Lebedev**

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
ermakvlad1986@mail.ru

**Аннотация.** В статье обсуждаются результаты измерения и моделирования направленных свойств КВ-антенны типа дельта, расположенной в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (с.п. Торы, Республика Бурятия). Измерения проводились с привлечением беспилотного летательного аппарата DJI Matrice 100. Для визуализации эксперимента по оперативному расчету разработан программный комплекс, учитывающий поляризационную диаграмму направленности антенн, подобные возможности отсутствуют в бесплатных и популярных версиях программ по моделированию направленных свойств антенн, таких как MMANA, 4NEC2.

**Ключевые слова:** диаграмма направленности антенны, поляризация, беспилотный летательный аппарат, математическое моделирование.

**Abstract.** The results of measuring and modeling the directional properties of a delta-type HF antenna located in the Tory State Federal District, the Republic of Buryatia are discussed. Antenna measurements were carried out using the DJI Matrice 100 UAV. To visualize the operational calculation experiment, a software package was developed that takes into account the polarization radiation pattern of antennas; such capabilities are not available in free and popular versions of antenna simulation programs, such as MMANA, 4NEC2.

**Keywords:** antenna pattern, polarization, unmanned aerial vehicle, math modeling.

**ВВЕДЕНИЕ**

Важной характеристикой любой антенны является ее поляризационная диаграмма направленности (ДН), которую необходимо учитывать для правильной интерпретации получаемых данных. Для расчета направленных свойств антенн разработаны такие программы как, например, MMANA, позволяющая строить ДН антенны для каждой компоненты поля. При этом представить, как ориентирован вектор поля, достаточно сложно, необходимо дополнительно обрабатывать выходные данные. 4NEC2 имеет подобный MMANA функционал, однако вид выходных данных также затрудняет объединение в расчетах приемной и передающей антенн. Для решения такой задачи разработан программный комплекс, позволяющий наглядно визуализировать поляризационную ДН антенн, с возможностью расчета канала связи двух антенн.

Разработанный программный комплекс использовался для моделирования эксперимента по облету КВ-антенны типа дельта, расположенной в Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (ГФО ИСЗФ СО РАН, с.п. Торы, Республика Бурятия). Для измерений привлекался беспилотный летательный аппарат (БПЛА) DJI Matrice 100 с закрепленными на корпусе передатчиком и антенной (электрический диполь). Измерения ДН проводились в диапазоне частот 1–7 МГц.

**КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРЯЕМОЙ АНТЕННЫ**

Конструкция измеряемой антенны представляет собой равнобедренный треугольник с основанием,

состоящим из двух лучей по 18 м, расположенным параллельно поверхности земли на высоте 1.5 м. В центре основания через согласующий симметрирующий трансформатор проходит запитка антенны, а резистивная нагрузка номиналом 900 Ом находится на вершине антенны, в 9 м над основанием. В эксперименте методом облета замерялись параметры двух дельтаобразных антенн, использующихся в качестве приемных и расположенных ортогонально друг другу на общей опорной мачте.

При таких размерах антенны ее испытание в безэховой камере достаточно трудоемко и очень дорого. Направленные свойства смоделированной антенны с высокой вероятностью отличаются от реальных, поэтому, пожалуй, самым простым и доступным способом уточнения/корректировки ДН является облет с привлечением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) [Virone, 2014; Picar et al., 2014; Bolli et al., 2016].

**ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММЫ  
НАПРАВЛЕННОСТИ КВ-АНТЕННЫ**

Облет антенн осуществлялся в дальней зоне, в верхней полусфере радиусом 200 м. В дальней зоне выражение для мощности принятого сигнала:

$$P_r(\vec{R}) = P_t \frac{G_t(\vec{R}, \alpha, \beta, \gamma)}{4\pi R^2} \frac{\lambda^2 G_{r\_ant}(\vec{R})}{4\pi} \times |\vec{p}_t(\vec{R}, \alpha, \beta, \gamma) \cdot \vec{p}_{r\_ant}(\vec{R})| G_r, \quad (1)$$

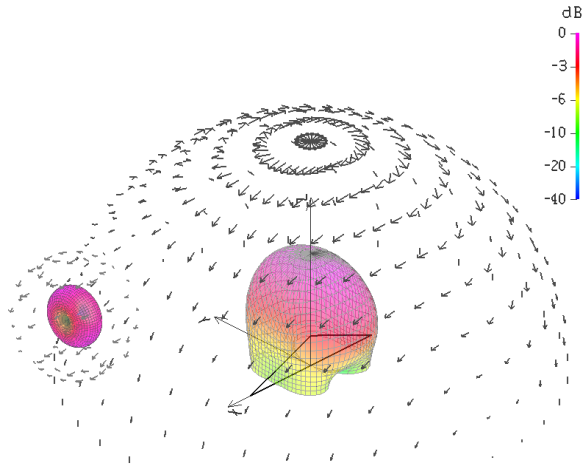


Рис. 1. Визуализация облета дельта-антенны, ее ДН и направления векторов напряженности электрического поля антенн

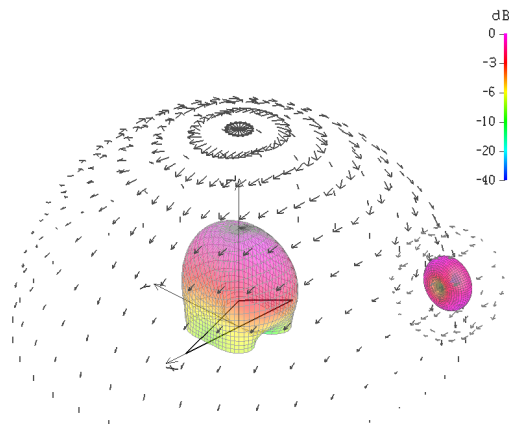


Рис. 2. Визуализация облета дельта-антенны, ее ДН и направления векторов напряженности электрического поля антенн

где  $\vec{R}$  — радиус-вектор, направленный от измеряемой антенны на БПЛА;  $R$  — дальность от измеряемой антенны до БПЛА;  $\lambda$  — длина волны;  $G_t(\vec{R}, \alpha, \beta, \gamma)$  — коэффициент усиления тестирующей антенны, ориентация которой определяется углами Эйлера  $\alpha, \beta, \gamma$  (соответственно рыскание, тангаж, крен);  $G_{r,ant}(\vec{R}) = G_{r,ant,max} F_{r,ant}(\vec{R})$ , — коэффициент усиления приемной антенны. Поляризационные характеристики тестирующей и измеряемой антенн определяются соответственно  $\vec{p}_t(\vec{R}, \alpha, \beta, \gamma)$  и  $\vec{p}_{r,ant}(\vec{R}) \cdot G_r$  — коэффициент, включающий потери в фидерном тракте и усиление приемника.

Задача состоит в измерении тестируемой диаграммы направленности  $F_{r,ant}(\vec{R})$ , связанной с коэффициентом усиления:

$$G_{r,ant}(\vec{R}) = G_{r,ant,max} F_{r,ant}(\vec{R}),$$

где  $G_{r,ant,max}$  — максимальный коэффициент усиления.

### ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ДН ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ ТИПА ДЕЛЬТА

Разработан программный комплекс для расчета ДН антенны, позволяющий также визуализировать

положение и ориентацию приемной и передающей антенн. Облет проводился в вертикальных плоскостях вдоль (рис. 1) и поперек антенны (рис. 2), в обоих случаях диполь на БПЛА ориентирован параллельно плоскости антенны.

На рис. 1 и 2 в центре системы координат (СК) в плоскости XZ представлена измеряемая дельта-антенна, для которой проводились измерения, и соответствующая ей ДН. Слева (рис. 1) и справа (рис. 2) представлены ДН электрического диполя, установленного на БПЛА. Рисунки 1 и 2 позволяют наглядно представить ориентацию поляризационной ДН дельта-антенны и тестирующего диполя на БПЛА.

На рис. 3 и 4 черной линией представлены результаты измерений, соответствующие облетам в плоскости антенны типа дельта и в плоскости, ей перпендикулярной, зеленой и синей линиями — результаты моделирования согласно (1) с использованием данных как MMANA, так и программного комплекса собственной разработки.

Из рис. 4 видно, в диапазоне частот 3–7 МГц результаты измерений и моделирования хорошо соответствуют друг другу, т. е. ДН, измеренная в плоскости, перпендикулярной дельта-антенне, соответствует модели. Из рис. 3 видно, что результаты измерений и моделирования различаются, причем результаты использования данных MMANA ближе к измерениям, по сравнению с результатами, полученными с помощью разработанного нами программного комплекса. Из рис. 3 можно сделать вывод о том, что ДН в плоскости дельта-антенны шире расчетной, что может быть обусловлено особенностями ближней зоны. Из рис. 3 также видно, что на больших частотах измерения и результаты моделирования согласуются лучше.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование эксперимента по облету КВ-антенн типа дельта, расположенных в ГФО ИСЗФ СО РАН (с.п. Торы, Республика Бурятия). Облет антенн осуществлялся в плоскостях как параллельной, так и перпендикулярной плоскости антенны, ориентация электрического диполя, установленного на БПЛА, всегда оставалась параллельной плоскости антенны. Измерения проводились в диапазоне частот 2–7 МГц. Моделирование проводилось согласно уравнению (1), для чего необходимо было учесть поляризационные ДН антенны типа дельта и электрического вибратора. Для моделирования такого эксперимента разработан программный комплекс, позволяющий визуализировать поляризацию электромагнитного поля антенны, а также работать с выходными данными программы расчета ДН антенн MMANA.

В результате сравнения выяснено, что в плоскости, ортогональной плоскости антенны, результаты измерения и моделирования хорошо совпадают, в плоскости, параллельной плоскости антенны, результаты измерения и моделирование расходятся, причем эффективная ширина ДН в данном направлении больше расчетной, однако с повышением рабочей частоты различие между измерениями и моделированием уменьшается.

Сравнение результатов моделирования с результатами измерения диаграммы направленности КВ-антенны типа дельта методом облета с привлечением беспилотного летательного аппарата DJI MATRICE 100

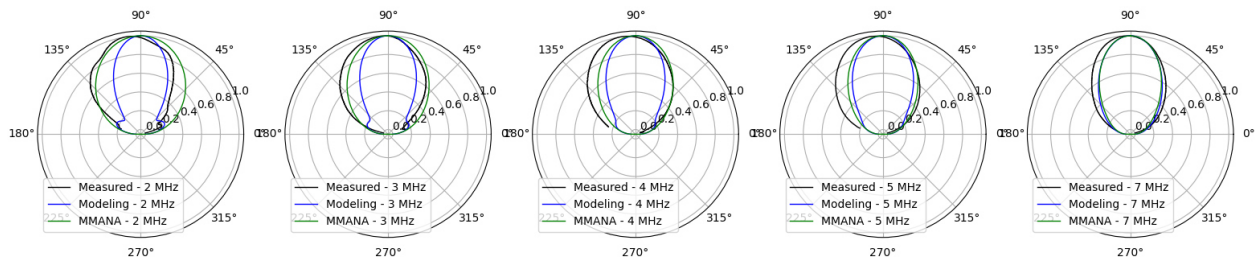


Рис. 3. ДН в плоскости дельта-антенны: черная линия — результаты измерений; зеленая — результаты моделирования с привлечением MMANA; синяя линия — результаты моделирования с помощью разработанного программного комплекса

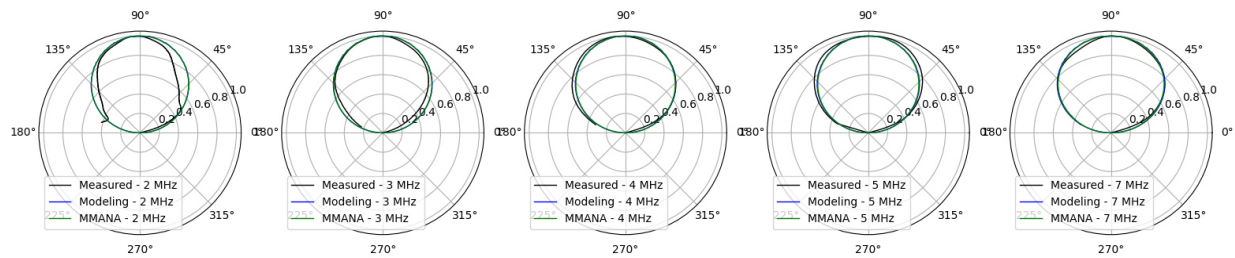


Рис. 4. ДН в плоскости, перпендикулярной дельта-антенне: черная линия — результаты измерений; зеленая — результаты моделирования с привлечением MMANA; синяя линия — результаты моделирования с помощью разработанного программного комплекса

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Virone G. Antenna Pattern Verification System Based on a Micro Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2014. Vol. 13. P. 4.

Picar A.M., Ranvier S., Anciaux M., Lamy H. Modeling and calibration of BRAMS antenna systems. *Proc. IMC*. Giron, 2014. P. 6.

Bolli P., Paonessa F.; Pupillo G., et al. Antenna pattern characterization of the low-frequency receptor of LOFAR by means of an UAV-mounted artificial test source. *Proc. SPIE*. 2016. Vol. 9906, 99063V. 11 p.