

Измерение диаграммы направленности КВ антенн методом облета с привлечением беспилотного летательного аппарата DJIMatrice 100

В.П. Лебедев, А.В. Подлесный, М.В.Цедрик, В.И. Куркин

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук. Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.126А, а/я 291.
E-mail: uzel@iszf.irk.ru, lebedev@iszf.irk.ru*

В обсерватории Торы (республика Бурятия) развернут радиофизический комплекс, предназначенный для исследования динамики ионосферы методом излучения и приема широкополосных радиосигналов в КВ диапазоне. Исследование тонких поляризационных эффектов принятых сигналов требует точного знания поляризационной структуры излучаемого поля в дальней зоне в полосе частот 1 – 30 МГц. Строгое решение электродинамической задачи требует больших затрат машинного времени, а также точного знания электрических свойств как подстилающей поверхности, так и объектов, находящихся в ближней зоне исследуемой антенны, часто такие данные не доступны, кроме того, электрические свойства подстилающей поверхности могут меняться в зависимости от погоды, сезона. В мировой практике для измерения направленных свойств антенн достаточно давно используется метод облета с привлечением самолетов, вертолетов, воздушных шаров, что требует проведения большой подготовительной работы и значительного количества времени, так как необходимо собрать большой объем измерений. Интерпретация экспериментальных данных в методе облета требует точного позиционирования калибровочных средств измерения относительно исследуемой антенны. В настоящее время привлечение малых БПЛА позволило значительно упростить процедуру калибровки антенны. В работе представлены результаты облета КВ антенн, расположенных в обсерватории Торы, также приведено описание созданного калибровочного аппаратного – программно комплекса, развернутого на БПЛА DJI Matrice 100, благодаря чему удалось добиться следующих характеристик: гибкое и точное задание траектории облета (точность позиционирования ~ 1.5 м); оперативное проведение измерений (развертывание системы с выходом на измерения в течение 60 минут), не требуется длительной и ресурсоемкой подготовительной работы; компактность и надежность бортового калибровочного аппаратного – программно комплекса: вес оборудования ~1 кг, размер калибровочной антенны ~2м, время облета ~15-20 мин.; использование открытого ПО (SDK), управления БПЛА, позволило в реальном масштабе времени на месте проводить расчет траектории полета с учетом изменения ракурса БПЛА, а также возможность разработать дополнительный функционал, необходимый для решения задач калибровки антенны методом облета.

Ключевые слова: антенны, БПЛА, измерение диаграммы направленности, метод облета

Measurement of the antenna pattern using the flyby method with the attraction of the unmanned aircraft DJI Matrice 100

V.P. Lebedev, A.V. Podlesny, M.V. Cedric, V.I. Kurkin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Russia, 664033, Irkutsk p/o box 291; Lermontov st., 126a*

A radiophysical complex designed to study dynamics of the ionosphere through radiation and reception of broadband radio signals in the HF band has been deployed at the Tory Observatory

(Republic of Buryatia). To study the subtle polarization effects of received signals, we need to know the polarization structure of the radiated/transmitted field in the far-field region within the frequency bandwidth of 1 – 30 MHz. A strict solution to the electrodynamic problem implies much computing/processing time and accurate knowledge of the electrical properties of the underlying surface and objects near the antenna under study. Such data are often unavailable. Besides, electrical properties of the underlying surface may vary depending on weather and season. To measure directional responses, researchers all over the world have been using the flyby method involving airplanes, helicopters and balloons. This requires much time for pre-flight preparations implying acquisition of a large set of measurements. Interpretation of experimental data obtained with the flyby method requires precise positioning of calibration measuring instruments to the antenna under study. Currently, small UAVs have made it possible to significantly simplify the antenna calibration procedure. This paper presents the results of a flyby around HF antennas located at the Tory Observatory. We also provide the description of the calibration hardware and software that we developed for DJI Matrice 100 UAV, which allowed us to have the following characteristics: flexible and accurate flight path setting (positioning accuracy of ~ 1.5 m); prompt measurement (system deployment and access to measurements within 60 minutes), no lengthy or resource-intensive pre-flight preparations are required; small size/portability/compactness and reliability of on-board calibration hardware and software: equipment weight of ~ 1 kg, calibration antenna size of ~2 m, flight time of ~15-20 min.; use of open source software (SDK) for UAV control allowed us to calculate the flight path in real time, taking into account changes in the UAV angle, and to develop supplementary software and capabilities necessary to solve the problems of antenna calibration using the flyby method.

Keywords: antennas, antennas pattern, space radio source, UAV, flyby method.

Введение

Целью работы является измерение диаграмм направленности (ДН) КВ антенн, развернутых в наблюдательном пункте Торы, расположенном на территории республика Бурятия в 152 км от Иркутска. Измерения направленных свойств КВ антенн выполнялись методом облета с привлечением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Matrice 100, с закрепленным на корпусе БПЛА передатчиком и антенной (электрический диполь). Измерения ДН проводились в диапазоне частот 1 – 12 МГц для различных поляризаций электромагнитного поля.

Конструкция измеряемых антенн

Конструкция измеряемых антенны представляет собой равнобедренный треугольник с основанием, состоящим из двух лучей по 18 метров, расположенным параллельно поверхности земли на высоте 1,5 м. В центре основания через согласующий симметрирующий трансформатор происходит запитка антенны, а резистивная нагрузка номиналом 800 Ом находится на вершине антенны в 9 метрах над основанием. В эксперименте, методом облета замерялись параметры двух дельтаобразных антенн, использующихся в качестве приемных и расположенных ортогонально друг другу на общей опорной мачте. Внешний вид антенной системы, использующейся для разделения принимаемого сигнала на поляризационные компоненты, представлены на рис. 1 и 2.

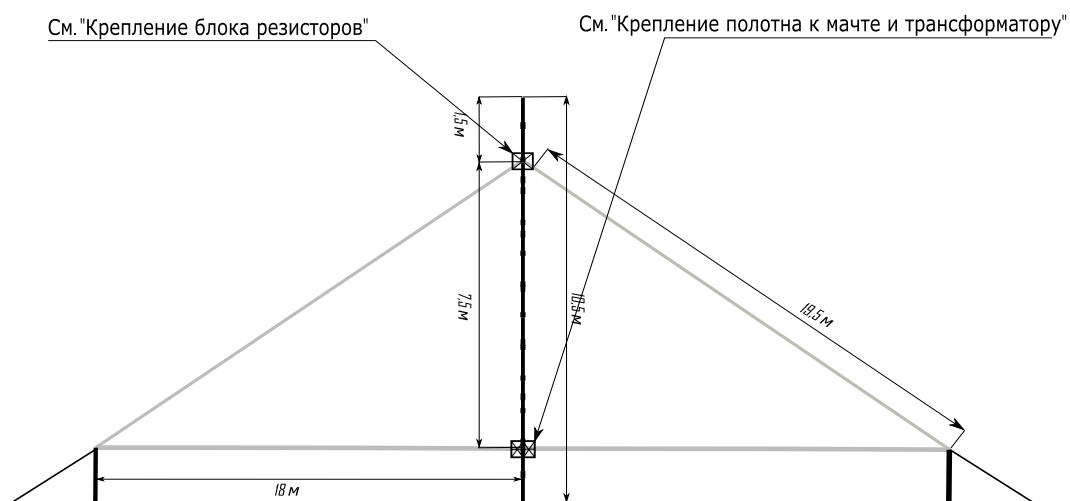


Рис.1. Антенна «Приемная Дельта» - вид с боку.

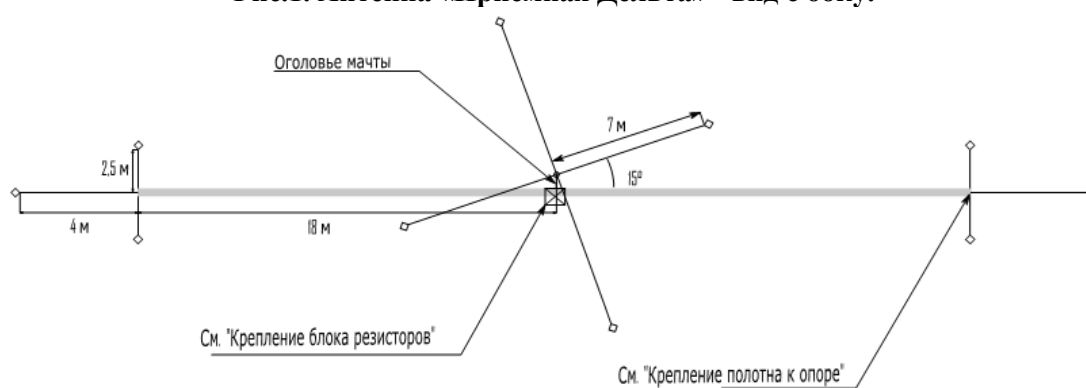


Рис. 2. Антенна «Приемная Дельта» - вид с верху.

Описание и характеристики беспилотного летательного аппарата

Облет антенн осуществлялся с привлечением БПЛА DJI Matrice 100, внешний вид которого представлен на рис. 3. DJI Matrice 100 разработана как открытая программно-аппаратная платформа с платой управления, оптимизированной под быстрое программирование с помощью DJI SDK.



Рис. 3. Квадрокоптер DJI Matrice 100.

На квадрокоптере DJI Matrice 100 установлены специальные порты питания и связи. Эта летающая платформа оборудована двумя параллельными CAN и двумя параллельными UART портами. Данные с этих портов передаются на землю по протоколу DJI, далее их можно обрабатывать самостоятельно.

Matrice 100 обладает пониженной вибрацией. Рама выполнена из карбона, лучи устанавливаются через вибропоглощающие прокладки, специальные подпрограммы в ПО отслеживают возникновение вибраций на каждом луче и оптимизируют обороты

двигателя. Под двигателями, на конце лучей установлены специальные опоры-ножки, оборудованные пневматическими амортизаторами. Внутри ножек находятся всенаправленные антенны, что позволяет: обеспечить необходимые маневренность и стабильность пилотирования при достаточно сильных порывах ветра, а также способствует увеличению дальности полета. Конструкция центральной рамы позволяет установить как основное, так и дополнительное оборудование. В таблице 1 приведены технические характеристики DJI Matrice 100.

Таблица 1. Технические характеристики DJI Matrice 100.

Диагональ	650 мм
Вес (с батареями TB47D)	2355 гр
Максимальный полетный вес	3400 гр
Точность удержания положения (режим позиционирования с GPS)	по вертикали 0,5 м; по горизонтали 2,5 м
Соппротивление ветру	10 м/с
Время зависания (с батареями TB47D)	без загрузки: 22 мин; загрузка 500 г: 17 мин; загрузка 1 кг: 13 мин
Дальность действия	2 км (открытое пространство)
Рабочая температура	-10 ~ 40 С

Описание подвешного передающего модуля.

Подвешной передающий модуль представляет собой формирователь сигналов на основе прямого цифрового синтеза, запитанный от собственного аккумуляторного источника питания через преобразователь на 3.3 В. Выход формирователя сигнала через фильтр низких частот и миниатюрный согласующий ВЧ-трансформатор нагружен на передающую антенну, выполненную в виде диполя с длиной плеча 0.8 м.

Специально для миниатюрного ЛЧМ-передатчика была разработана печатная плата, разводка которой показана на рис. 4.

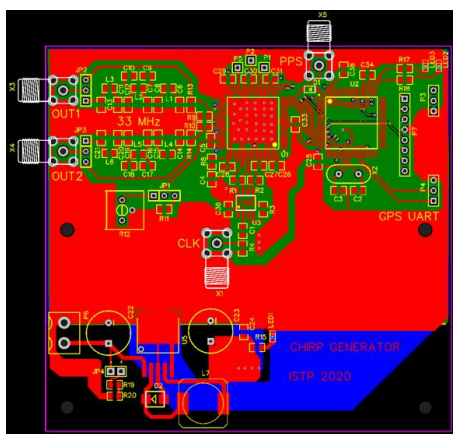


Рис.4. Разводка печатной платы миниатюрного ЛЧМ КВ-передатчика

Общий вид готовой платы передатчика, размещенной на стандартном подвесе для квадрокоптера DJI Matrice 100, показан на рис. 5.

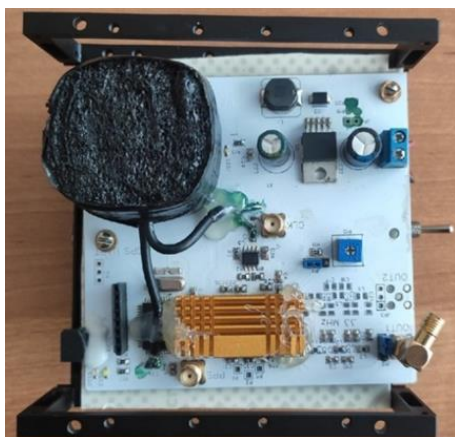


Рис. 5. Плата миниатюрного КВ-передатчика.

В качестве формирователя калибрующего ЛЧМ-сигнала была использована микросхема AD9854. Такой выбор обусловлен её доступностью и характеристиками: AD9854 обладает разрядностью шага приращения частоты 48 бит и разрядностью выходного ЦАП 12 бит. Управление DDS осуществляется посредством микроконтроллера Atmega 328.

На плате калибрующего модуля установлен кварцевый генератор на 20 МГц и по умолчанию настроен умножитель частоты 4, таким образом, максимальная частота генератора не превышает 40 МГц. Так как частоты, используемые при калибровке КВ-антенн, не превышали 12 МГц, на плате, с целью уменьшения уровня комбинационных частот в спектре выходного сигнала, был применен фильтр низких частот (ФНЧ), имеющий полосу пропускания в 33 МГц.

Система регистрации принятого сигнала

В качестве системы регистрации использовалось штатное приемное устройство ионозонда «Ионозонд-МС»[1]. Оно представляет собой многоканальный приемник сигналов, построенный с использованием программно-определяемых радиосистем по схеме прямой оцифровки с широкополосным неперестраиваемым преселектором на входе. Составные части приемного устройства и взаимосвязи между ними показаны на рис. 6. На вход устройства подается сигнал с исследуемой антенны.

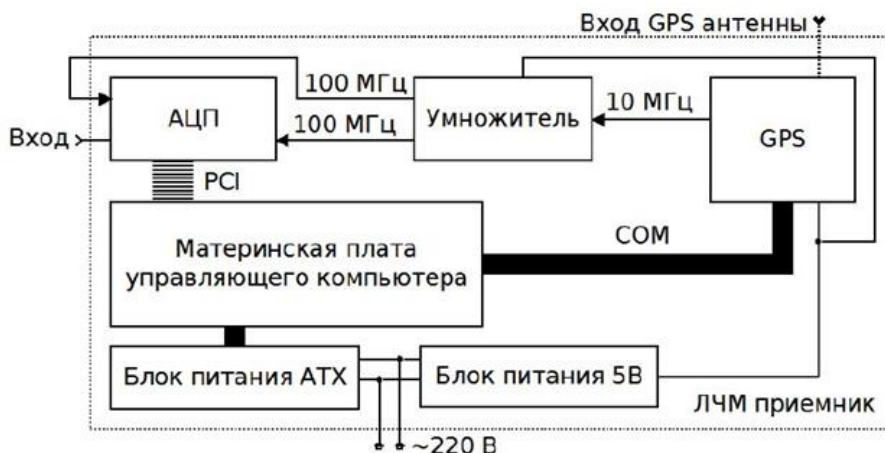


Рис. 6. Блок-схема регистрирующего устройства.

Параметры регистрирующего устройства приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры регистрирующего устройства.

Характеристика	Значение
Диапазон рабочих частот	1 - 170 МГц
Скорость перестройки частоты	0,5 - 5000 кГц/с
Режим работы	ВЗ, НЗ, ВНЗ, «Доплер»
Ширина полосы пропускания	8-80 кГц
Формат выходных данных	wav, dat, sbf
Чувствительность в рабочем диапазоне	Не хуже 0.5 мкВ
Количество каналов оцифровки (гетерогенирования)	4 (16)

Методика измерения диаграммы направленности КВ антенн

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

$$P_r(\vec{R}) = P_t \frac{G_t(\vec{R}, \alpha, \beta, \gamma)}{4\pi R^2} \cdot \frac{\lambda^2 \cdot G_{r_ant}(\vec{R})}{4\pi} \cdot |\vec{p}_t(\vec{R}, \alpha, \beta, \gamma) \cdot \overrightarrow{p_{r_ant}}(\vec{R})| \cdot G_r,$$

где \vec{R} - радиус вектор, направленный от измеряемой антенны на БПЛА, R - дальность от измеряемой антенны до БПЛА, λ - длина волны, $G_t(\vec{R}, \alpha, \beta, \gamma)$ - коэффициент усиления тестирующей антенной, ориентация которой определяется углами Эйлера: α, β, γ (соответственно: рыскание, тангаж, крен). $G_{r_ant}(\vec{R})$ - коэффициент усиления приемной антенны. Поляризационные характеристики тестирующей и измеряемой антенн определяются соответственно $\vec{p}_t(\vec{R}, \alpha, \beta, \gamma)$ и $\overrightarrow{p_{r_ant}}(\vec{R})$. G_r - коэффициент, включающий потери в фидерном тракте и усиление приемника.

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

$$G_{r_ant}(\vec{R}) = G_{r_ant_max} \cdot F_{r_ant}(\vec{R}),$$

где $G_{r_ant_max}$ - максимальный коэффициент усиления.

На рисунке 7 представлены основные режимы облета измеряемых антенн:

- рис. 7а - облет в вертикальной плоскости антенны, диполь параллелен плоскости антенны ($\alpha = 0, \beta = 0, \gamma = 0$).
- рис. 7б - облет в вертикальной плоскости перпендикулярной полотну антенны, диполь параллелен плоскости антенны ($\alpha = 90^\circ, \beta = 0, \gamma = 0$).

Зеленые стрелки на рисунке 7 показывают ориентацию вектора E поля излучения.

В процессе облета БПЛА движется согласно полетному заданию с контролем своего положения по GPS. Количество используемых спутников GPS варьируется от 15 – до 18, что обеспечивает точность позиционирования на заданной траектории порядка 1 м. и стабильность ориентации порядка 5°. Двигаясь по заданной траектории, БПЛА 10 раз в секунду записывает свою телеметрию, что в дальнейшем позволяет, синхронизируя ее с результатами записи принятого сигнала, провести четкую привязку с угловым положением БПЛА относительно тестируемой антенны.

На рисунках 8 – 11 представлены результаты измерения амплитуды зарегистрированного сигнала на измеряемой антенне типа «Дельта» на частотах: 3.0, 4.0, 5.5, 7.0 МГц соответственно.

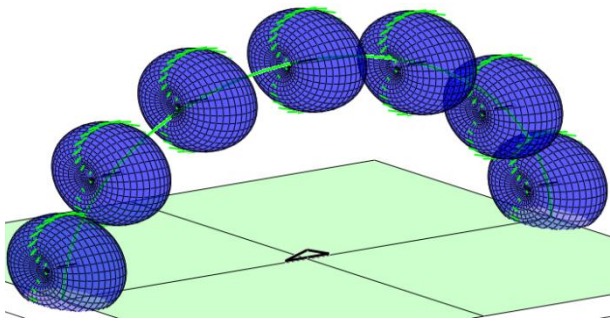


Рис. 7а. Облет в вертикальной плоскости антенны, ориентация диполь параллелен плоскости антенны.

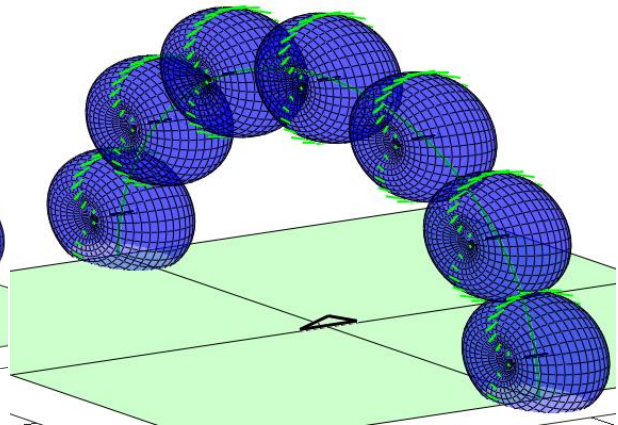


Рис. 7б. Облет в вертикальной плоскости, перпендикулярно полотну антенны, диполь параллелен плоскости антенны.

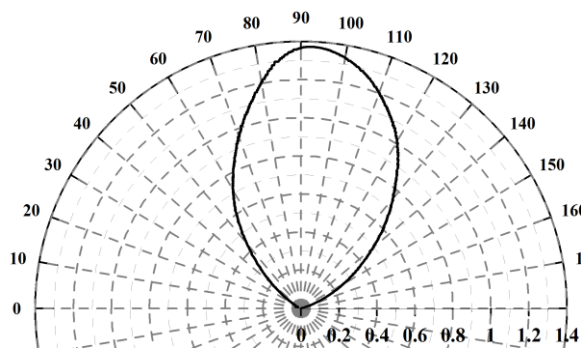


Рис. 8а. Облет в вертикальной плоскости антенны, измерения на частоте 3 МГц.

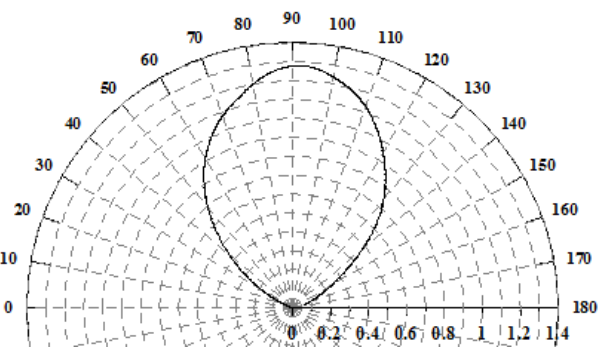


Рис. 8б. Облет в вертикальной плоскости, перпендикулярно полотну антенны, измерения на частоте 3 МГц.

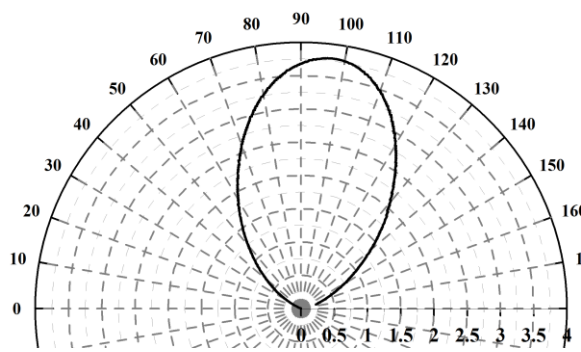


Рис. 9а. Облет в вертикальной плоскости антенны, измерения на частоте 4 МГц.

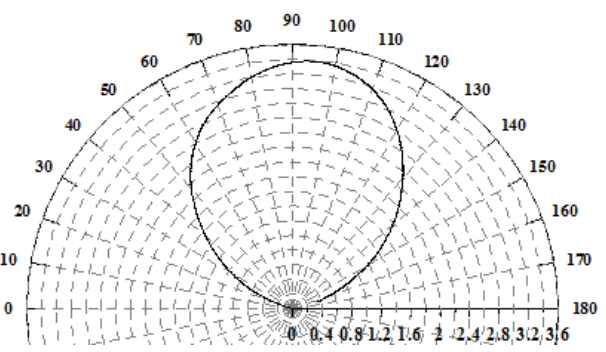


Рис. 9б. Облет в вертикальной плоскости, перпендикулярно полотну антенны, измерения на частоте 4 МГц.

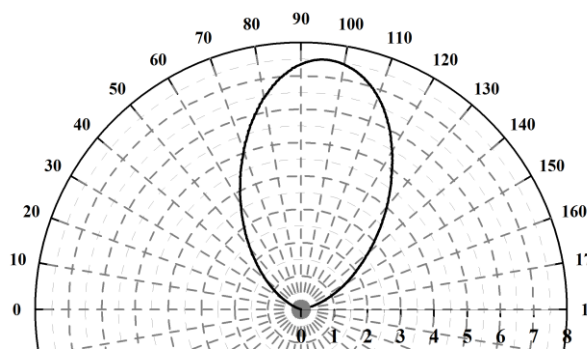


Рис. 10а. Облет в вертикальной плоскости антенны, измерения на частоте 5.5 МГц.

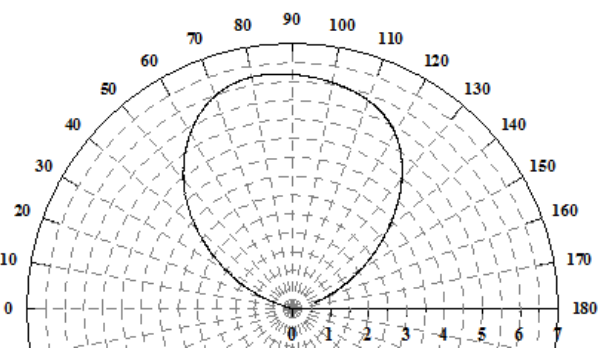


Рис. 10б. Облет в вертикальной плоскости, перпендикулярно полотну антенны, измерения на частоте 5.5 МГц.

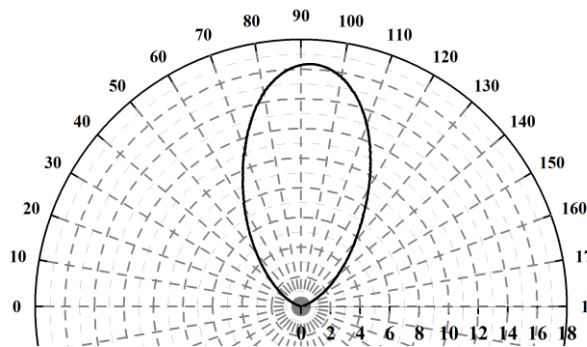


Рис. 11а. Облет в вертикальной плоскости антенны, измерения на частоте 7 МГц.

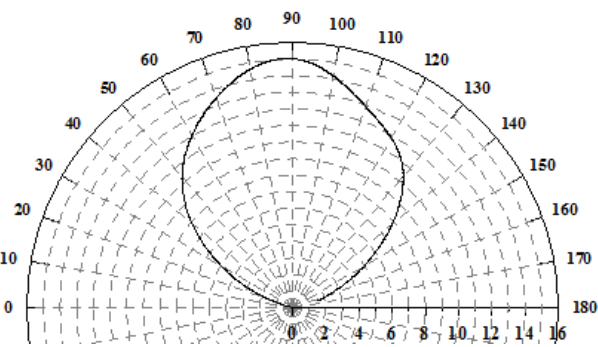


Рис. 11б. Облет в вертикальной плоскости, перпендикулярно полотну антенны, измерения на частоте 7 МГц.

Заключение

В работе представлены результаты облета КВ антенн, расположенных в обсерватории Торы (ИСЗФ СО РАН), представлено описание созданного калибровочного аппаратного – программнокомплекса, развернутого на борту DJI Matrice 100. С помощью разработанного комплекса проведено более 100 облетов КВ антенн, измерения проводились в диапазоне частот 1 – 12 МГц.

Литература

1. А.В. Подлесный, И.Г. Брынько, В.И. Куркин. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы. // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – № 4. – С. 24-31.