

УДК 621.396.96

Метод виртуальной вышки в задаче измерения динамических диаграмм направленности крупноапертурных ФАР

Веденькин Д. А., Гогоберидзе Т. О., Классен В. И.,
Левитан Б. А., Седельников Ю. Е., Топчиев С. А.

Постановка задачи: в настоящее время все большую роль в системе обеспечения безопасности страны играют средства дальнего радиолокационного обнаружения. Важнейшим элементом этих систем, во многом определяющим их технико-тактические показатели, являются крупноапертурные антенные системы, в качестве которых применяются активные фазированные (АФАР) и цифровые (ЦАР) антенные решетки. Измерение их характеристик представляет собой сложную задачу, как в техническом, так и организационном плане. Традиционные методы антенных измерений зачастую неприменимы. Задача работы состоит в теоретическом обосновании нового метода измерений характеристик крупноапертурных фазированных антенных решеток (ФАР), позволяющего существенно сократить время измерений и стоимость их проведения. **Целью работы** является оценка влияния факторов, определяющих основные показатели точности, и определение условий, при которых обеспечиваются приемлемые метрологические характеристики модифицированного облетного метода при использовании в качестве носителя радиозонда доступного уже сегодня беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультироторного типа. **Используемые методы.** В части подходов к обеспечению требуемых показателей использованы: аналитические и численные методы прикладной теории антенн, вычислительный эксперимент с применением апробированных программных средств. **Новизна работы** заключается в предложении метода контроля параметров крупноапертурных антенн облетным методом с проведением измерений в зоне ближнего излученного поля. **Результат.** Показана возможность проведения измерений параметров крупноапертурных ФАР облетным методом в промежуточной зоне излучения антенны методом перефокусировки с использованием существующей измерительной аппаратуры с точностными показателями, практически не уступающими показателям традиционных методов антенных измерений в дальней зоне. **Практическая значимость работы** заключается в расширении потенциала облетного метода ближнеполюсных антенных измерений крупноапертурных антенн с применением метода виртуальной вышки.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, цифровая антенная решетка, антенные измерения, динамическая диаграмма направленности, облетный метод, перефокусировка, метод виртуальной вышки, беспилотный летательный аппарат.

Введение

Задачи измерения параметров антенн, несмотря на богатую историю и огромный накопленный опыт, продолжают оставаться в числе актуальных до настоящего времени. В их числе – измерения крупноапертурных антенн вновь

Библиографическая ссылка на статью:

Веденькин Д. А., Гогоберидзе Т. О., Классен В. И., Левитан Б. А., Седельников Ю. Е., Топчиев С. А. Метод виртуальной вышки в задаче измерения динамических диаграмм направленности крупноапертурных ФАР // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 3. С. 269-293. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-3-269-293

Reference for citation:

Vedenkin D. A., Gogoberidze T. O., Klassen V. I., Levitan B. A., Sedelnikov Y. E., Topchiev S. A. Virtual Tower Method in the Task of Measuring Dynamic Radiation Patterns of Large Aperture PAAs. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 3, pp. 269-293 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-3-269-293

разрабатываемых радиолокационных станций (РЛС) в объемах и с точностями, отвечающими требованиям сегодняшнего дня. Традиционные методы, проверенные практикой [1-2], не всегда позволяют реализовать их в полной мере. Так, использование метода вышки, при котором измерительный зонд фиксируется в дальней зоне, обеспечивает простоту организации работ и надежность получаемых результатов, пока речь идет об антенных устройствах относительно небольших геометрических и электрических размеров. Для крупноапертурных антенн его реализация выливается в серьезную проблему. В ряде случаев, например, при расположении РЛС на берегу моря, использование метода вышки оказывается попросту невозможным. Реализация классического облетного метода представляет чрезвычайно дорогостоящую процедуру. Тем не менее, в случаях, когда требуется проверить характеристики крупноапертурных фазированных антенных решеток (ФАР) на месте дислокации, облетным комплексам трудно найти альтернативу. С середины 2010-х годов активно разрабатываются облетные измерительные комплексы на платформах беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного типа (рис. 1), используемых вместо самолетов или вертолетов [3-4].

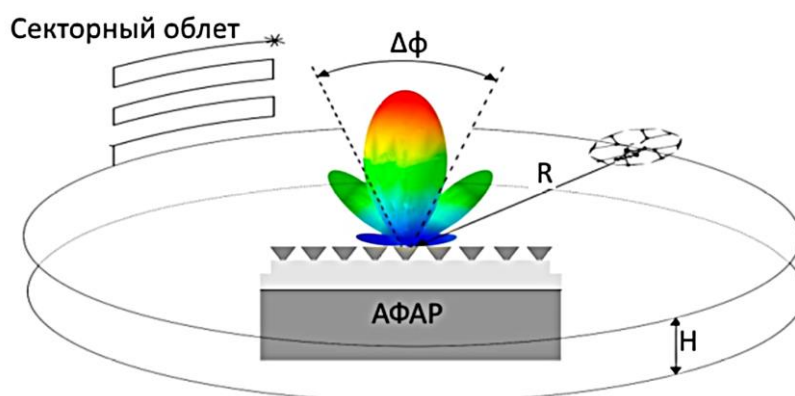


Рис. 1. Облетный метод с использованием БПЛА

С этой целью был создан отечественный измерительный комплекс на базе октокоптера с перестраиваемым по частоте передатчиком и измерительным приемником на борту (рис. 2), предназначенный для проведения измерений антенн дециметрового диапазона в режимах на прием и на передачу путем кругового облета тестируемой антенны. Для снижения неопределенности углового положения в момент измерения, зондовая антенна удерживалась в направлении тестируемой антенны 3-осевым гиросtabilизированным подвесом (рис. 3).

В принципе, подобные измерительные комплексы на основе БПЛА могли бы решить большую часть технических и экономических вопросов. Однако измерение параметров крупноапертурных антенн методами дальней зоны требует значительного полетного времени и высот подъема. Для крупноапертурных ФАР граница зоны Фраунгофера нередко удалена на 10 и более километров, а требуемые высоты подъема могут превышать 5 км. Суммарное полетное время в этих случаях может составлять сотни часов. БПЛА, способных эффективно справиться с подобной задачей, не появится в ближайшие 10-15 лет. В

настоящей работе рассматривается модификация облетного метода, позволяющего сократить и требуемые высоты подъема, и полетное время настолько, чтобы иметь возможность использовать в качестве носителя радиозонда БПЛА мультироторного типа, доступные уже сегодня.



Рис. 2. Измерительный комплекс
АО РК «Вектор» 2018 г.



Рис. 3. БПЛА с бортовой
аппаратурой

Новый метод антенных измерений

Способы сокращения размеров измерительных полигонов для крупноапертурных антенн основываются на проведении измерений при расстояниях, меньших условной границы дальней зоны $R_{изм} \leq 2L_{ант}^2/\lambda$, где $L_{ант}$ – максимальный из размеров апертуры. С этой целью еще в середине прошлого века было предложено производить измерения диаграмм направленности (ДН) зеркальных антенн при смещении облучателя из фокуса, чем достигалась фокусировка излучения в точку расположения приемной антенны на расстоянии, существенно меньшем границы дальней зоны [4]. Применительно к антенным решеткам для перефокусировки требуется введение надлежащей фазовой подставки путем соответствующего управления системой фазовращателей. Для ФАР дискретность традиционно используемых ферритовых фазовращателей и невысокое быстродействие их существенно ограничивали использование метода фокусировки на практике.

Развитие цифровых антенных решеток (ЦАР), которые используют аналого-цифровое преобразование сигнала в каждом приёмном канале и цифро-аналоговое преобразование в каждом передающем канале, а формирование диаграмм направленности производится путем обработки потоков цифровой информации, коренным образом изменяет ситуацию. Задача фокусировки теперь сводится к установке требуемых фазовых подставок цифровыми устройствами приемных или передающих каналов. Это открывает возможность модифицировать облетный метод с целью снизить требования к высоте подъема и продолжительности полета БПЛА, сохранив при этом метрологическую точность измерений. Для задач измерения характеристик ФАР развиты и применяются на практике методы измерений динамических диаграмм направленности, при реализации которых используется перемещение главного луча диаграммы направленности относительно антенны-зонда, находящейся в фиксированном положении [5-9].

Направления перефокусировки ($2\theta_0 - \theta_i, 2\varphi_0 - \varphi_j$)

Точка записания (r, θ_0, φ_0)

Смещенный главный луч

Главный луч

Направления на контрольные точки диаграммы направленности (θ_i, φ_j)

ФАР

По сравнению с классическим облетным методом предлагаемый метод представляется многообещающим ввиду возможности существенно сократить время измерений и стоимость их проведения. Однако окончательному решению о его реализации на практике должна предшествовать тщательная проработка как факторов, определяющих основные метрологические характеристики, так и условий, при которых применение метода «виртуальной вышки» может обеспечить требуемые показатели точности. К настоящему времени указанные оценки не проведены и условия, при которых обеспечиваются приемлемые метрологические характеристики, не установлены. Решение этих задач является целью настоящей работы. Среди факторов, определяющих точностные показатели, можно выделить условия проведения измерений – принципиальным является фактор расстояния между измеряемой и измерительной антеннами – и довольно многочисленную группу факторов, связанных с неидеальными условиями проведения измерений.

Оценка влияния величины «фокусного расстояния» на качество измеряемой ДН в отсутствие погрешностей любой природы

Как известно [1-2], непосредственные измерения методом дальней зоны обеспечивают точность, приемлемую для большинства практических ситуаций, если расстояние между измеряемой и измерительной антеннами составляет, по крайней мере, величину, не меньшую $(1...2)L_{ант}^2/\lambda$, где $L_{ант}$ – максимальный из размеров апертуры. Непосредственные измерения на меньшем расстоянии приводят к недопустимой погрешности результата. Для сокращения минимального расстояния еще в середине прошлого века было предложено вводить в апертурное распределение искусственную фазовую «добавку». С ее введением угловое распределение функции напряженности излучаемого поля в зоне Френеля отличается от случая дальней зоны незначительно. В первых работах, в задаче измерения ДН зеркальной антенны, это достигалось путем смещения облучателя вдоль фокальной оси. В последующие годы применение этого подхода рассматривалось применительно к задаче измерения параметров ФАР. В этих случаях использовалась соответствующая (квадратическая) фазовая «подставка», обеспечивающая близость фазовых соотношений в дальней зоне и зоне Френеля. Физически, введение указанной «подставки» означает фокусировку излучения антенны в точку в направлении (θ_0, φ_0) на конечном расстоянии R .

При проведении измерений методом перефокусировки одним из принципиальных является вопрос о выборе величины фокусного расстояния R (т.е. от измеряемой антенны до подвижной антенны-зонда). По существу, влияние этого фактора является основным, определяющим наличие методической погрешности метода. Очевидно, что величина ее тем меньше, чем больше величина фокусного расстояния. В работе [10] дана предварительная оценка: погрешность измерений, обусловленная методом перефокусировки, может считаться допустимо малой в угловой окрестности $\pm \sqrt{\frac{L_{ант}}{\lambda}} \cdot (2\Delta\theta_{0,5})$ главного луча ДН антенны с размером апертуры $L_{ант}$, если расстояние между антеннами $R \geq 3,3R_F$, где $R_F = 0,62L_{ант} \cdot \sqrt{\frac{L_{ант}}{\lambda}}$ – внутренний радиус зоны Френеля. Оценка основывается на представлении фазы поля в промежуточной зоне квадратической зависимостью и, соответственно, компенсации квадратической фазовой «подставкой».

Приведенная приближенная оценка требует уточнения, в том числе потому, что неоправданное увеличение расстояния влечет необходимость нахождения измерительной антенны на значительной высоте, что трудно реализуемо. Иллюстрацией этого служит рис. 5, где приведены данные для ФАР с сектором сканирования в вертикальной плоскости $\pm 20^\circ$ и $\pm 30^\circ$.

Так, при размере апертуры 100λ , согласно оценке [10] требуется обеспечить зависание БПЛА на высотах до 3000...4000 длин волн. Поэтому для исключения работы на больших высотах необходимы уточненные данные, ко-

торые могут быть получены путем прямого моделирования процесса измерения с перефокусировкой, не прибегая к упрощенным представлениям поля в промежуточной зоне. С этой целью моделируется излучение антенной решетки с равномерным амплитудным распределением и фазовым распределением, обеспечивающим синфазное сложение волн в точке с координатами (R, θ_0, φ_0) антенной решетки, составленной из ненаправленных элементов

$$E_{\text{решет}}(R, \theta, \varphi) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-M/2}^{M/2} J_{mn} \frac{e^{-jkR_{mn}(x_m, y_n, \theta, \varphi)}}{R_{mn}(x_m, y_n, \theta, \varphi)}, \quad (1)$$

где $J_{mn} = e^{jkR_{mn}(x_m, y_n, \theta_0, \varphi_0)}$.

Результаты представлены на рис. 6-7.

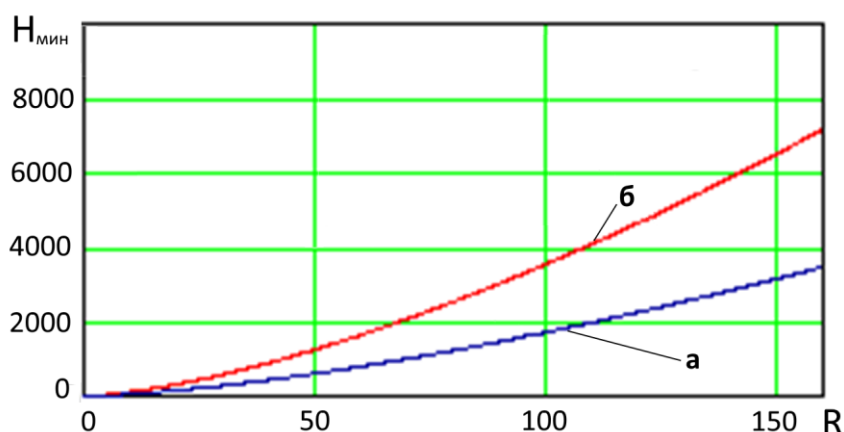


Рис. 5. Зависимость минимально необходимой высоты подъема антенны-зонда от размера апертуры обследуемой антенны: а) – при секторе сканирования $\pm 20^\circ$, б) – при секторе сканирования $\pm 30^\circ$. Все размеры нормированы к длине волны

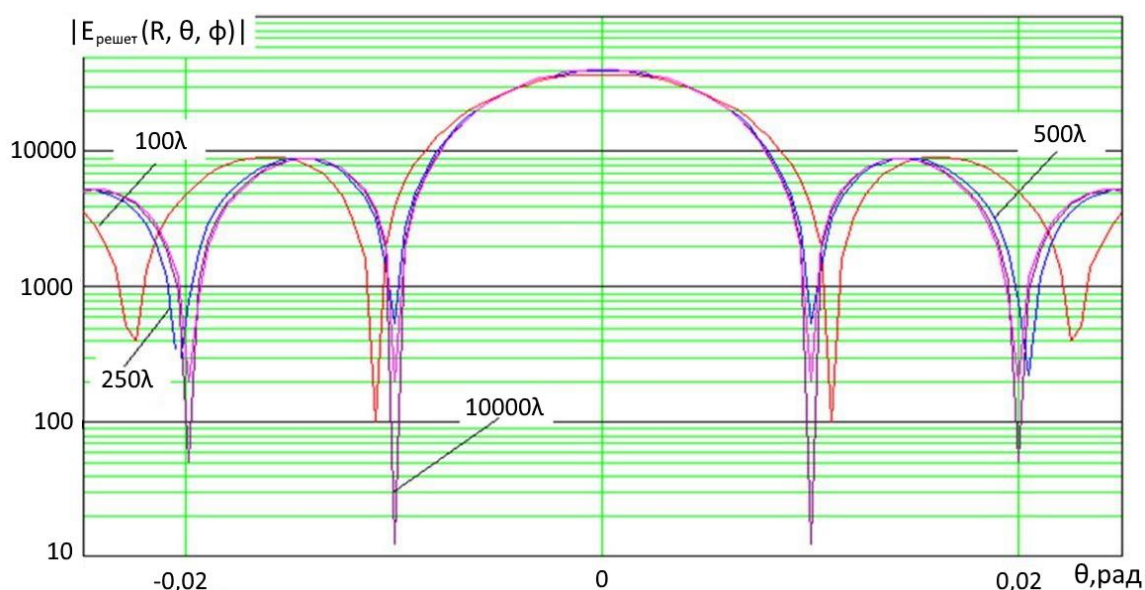


Рис. 6. ДН сфокусированной квадратной антенной решетки 200×200 изотропных элементов с равномерным амплитудным распределением, шаг – $\lambda/2$.
Направление излучения – по нормали

Аналогичный характер имеет зависимость «измеренного» коэффициента направленного действия (КНД) от величины фокусного расстояния. Расчетные данные для квадратной антенной решетки 200×200 изотропных элементов с равномерным амплитудным распределением и шагом $\lambda/2$, приведены на рис. 7.

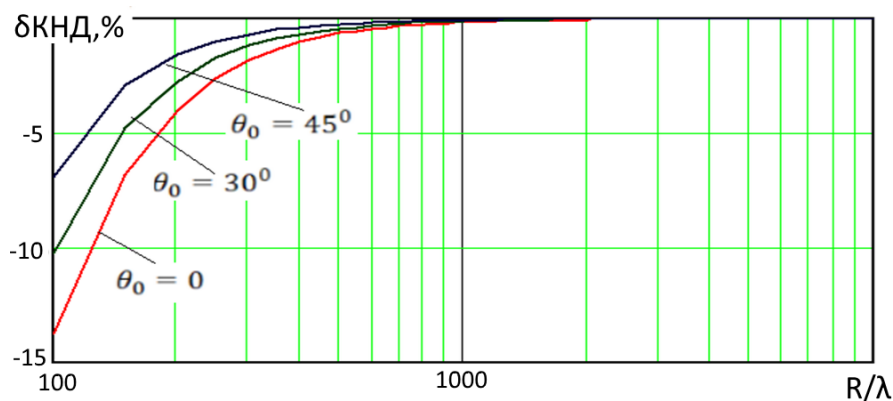


Рис. 7. Зависимость относительного снижения КНД (в процентах) при изменении фокусного расстояния для различных отклонений луча ФАР 0° , 30° и 45° .
Антенна – квадрат со стороной 100λ

Как показывают приведенные данные (рис. 6-7), а также результаты аналогичных расчетов для других электрических размеров апертур, ширина ДН и уровни ближайших боковых лепестков остаются практически неизменными при значениях величины относительного фокусного расстояния $R/L_{\text{ант}} \geq 4 \dots 5$. Снижение КНД при этом не превышает нескольких процентов. Как показано в [12], для сфокусированных апертур в средах без потерь имеет место принцип подобия, заключающийся в том, что основные параметры создаваемых ими электромагнитных полей для случаев равных относительных фокусных расстояний R/L практически совпадают.

Как основной вывод, отсюда следует, что при измерениях параметров ДН крупноапертурных ФАР методом перефокусировки минимальное расстояние от антенны до зонда на сферической поверхности составляет величину, не превышающую $4 \dots 5$ размеров апертуры обследуемой антенны. При выполнении указанных условий методическая составляющая погрешности измерений практически отсутствует.

Оценка точности результатов измерений параметров ФАР методом перефокусировки в реальных условиях

В реальных условиях существует ряд факторов, приводящих в конечном счете к снижению точности измерения методом перефокусировки. Помимо очевидных, таких как инструментальная погрешность измерительных приборов, влияние отражений от окружающих объектов, неточное значение частоты колебаний, влияние метеоусловий, ошибки оператора, при реализации данного

метода проявляется наличие ряда специфических, ему свойственных, погрешностей. Ниже рассматриваются источники указанных погрешностей и дается их количественная оценка. К их числу относятся:

- погрешность, обусловленная дискретностью процесса измерений по пространственным координатам $\delta_{\text{дискр}}$;
- погрешность измерения амплитудных значений напряженности поля в точках измерений (или плотности потока мощности) обусловленная используемой аппаратурой измерений $\delta_{\text{аппарат}}$.

Эти составляющие являются некоррелированными, суммарная погрешность может оцениваться как

$$\delta_{\text{сумм}} = \sqrt{\delta_{\text{дискр}}^2 + \delta_{\text{аппарат}}^2} \quad (2)$$

Проведем оценку указанных составляющих.

Оценка погрешности, обусловленной дискретностью процесса измерений по пространственным координатам

Измерения интенсивности электромагнитного поля, согласно [11], производится в ряде точек на поверхности сферы с конечным их числом (рис. 4).

По измеренным данным $F(\theta_n, \varphi_m)$ производится расчет основных параметров – ширины ДН, уровня боковых лепестков, а также коэффициента усиления. Вследствие дискретности измерения указанные параметры определяются с некоторой погрешностью $\Delta_{\text{шДН}}$, $\Delta_{\text{УБЛ}}$, $\Delta_{\text{КУ}}$. Очевидно, что указанные погрешности тем меньше, чем меньше шаг измерений по угловым координатам $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$, т.е., чем больше число отсчетов. Очевидно, и то, что при организации измерений следует стремиться обойтись наименьшим по возможности числом отсчетов. т.к. при этом обеспечивается минимальная трудоемкость измерительного процесса.

Оценка ширины ДН. Процесс обработки данных измерений осуществляется следующим образом. Измеряется ДН по мощности в пределах главного лепестка ДН в сечении $\varphi = \text{const}$ в M точках: $F_{\text{изм } i}$, где $i = 1, 2, \dots, M$. Далее, производится аппроксимация некоторой непрерывной функцией $F_{\text{аппрокс}}(\theta, \varphi, F_{\text{изм } i})$. Ширина ДН в сечении $\varphi = \text{const}$ определяется из условия:

$$F_{\text{аппрокс}}(\theta_{0,5}, \varphi, F_{\text{изм } i}) = 0,5 \cdot \max_{\theta, \varphi} F_{\text{аппрокс}}(\theta, \varphi, F_{\text{изм } i}) \quad (3)$$

В простейшем случае для оценок достаточно использовать модель ДН линейной антенны с равномерным амплитудным распределением. Дискретность измерения характеризуется числом отсчетных точек в угловом секторе, соответствующем главному лучу. Ниже, на рис. 8 показаны результаты аппроксимации ДН кусочно-линейными функциями. При аппроксимации полиномом оценка требуемого числа точек будет не хуже полученной.

На основании подобных оценок, проведенных для различного числа отсчетных точек $M = 3, 4, \dots, 40$, нетрудно установить количественную зависимость погрешности определения ширины ДН от числа точек измерения значений ДН. Результаты представлены на рис. 9.

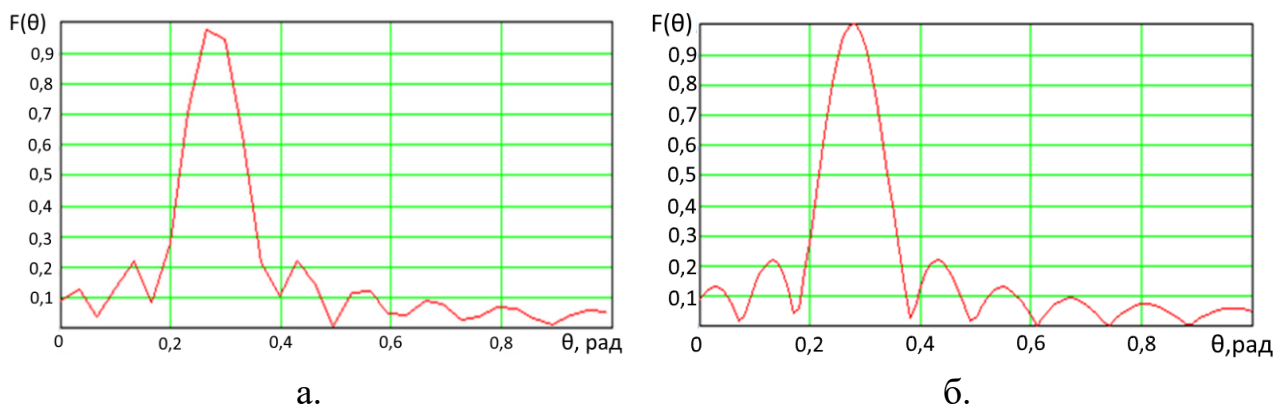


Рис. 8. «Измеренные ДН» при различном числе отсчетных точек:
а) 3 точки, б) 10 точек

Оценка уровня боковых лепестков (УБЛ) осуществляется аналогичным образом. Величина УБЛ определяется традиционным образом: на заданном множестве значений измеренных ДН в отсчетных точках $F_{изм}(\theta_i, \varphi) = F_{изм i}$ находится максимальное значение в области вне главного лепестка с шагом, соответствующим наличию M отсчетов в пределах главного лепестка. На основании расчетов, проведенных для различного числа отсчетных точек $M = 3, \dots, 40$, можно установить количественную зависимость погрешности определения УБЛ. Результаты представлены на рис. 9.

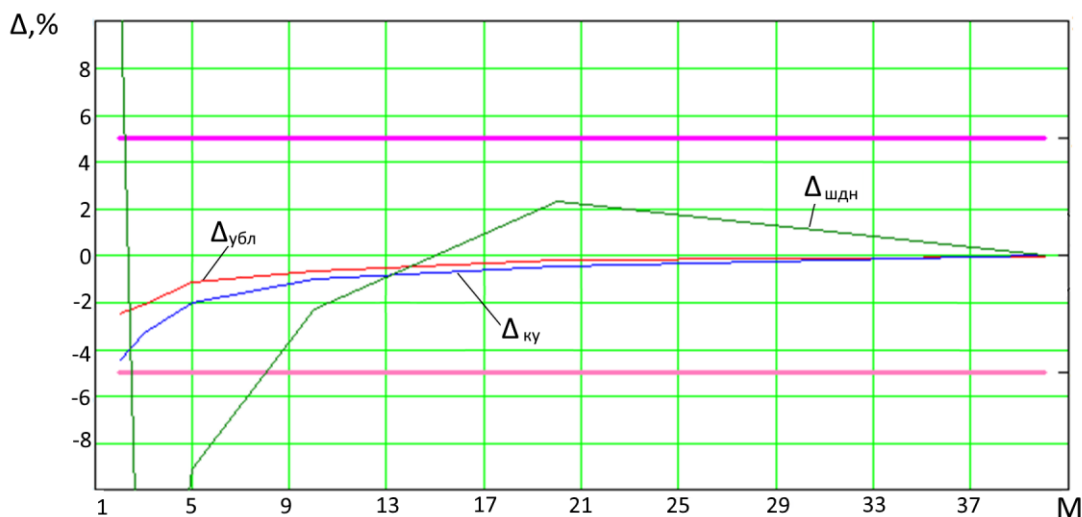


Рис. 9. Зависимость погрешности определения ширины ДН, КУ и УБЛ (в процентах) от числа точек измерения значений ДН (ДДН)

Оценка зависимости КНД от числа отсчетных точек может быть проведена аналогичным образом

$$КНД(\theta_0, \varphi_0) = \frac{4\pi \cdot F(\theta_0, \varphi_0)}{\iint F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}, \quad (4)$$

где интеграл (4) представляется суммой, число членов которой определяется шагом измерений по угловым координатам – M . На основании расчетов, про-

веденных для различного числа отсчетных точек $M = 3, \dots, 40$ можно установить количественную зависимость погрешности определения КНД. Результаты представлены на рис. 9.

На основании данных (рис. 9) можно провести оценку погрешности измерения вследствие дискретности процесса измерений по угловым координатам, а также оценить минимально необходимый шаг измерений исходя из допустимой погрешности.

Оценка погрешности измерения, обусловленной используемой аппаратурой

Погрешность измерения определяется, главным образом, следующими факторами:

- погрешностью $\delta_{\text{приб}}$ используемых измерительных приборов;
- неточным положением антенны-зонда и связанным с ним отличием расчетного значения точки фокусировки от действительного (погрешность $\delta_{\text{фок}}$);
- отличием ДН антенны-зонда от изотропной (погрешность $\delta_{\text{зонд}}$).

Оценка СКО суммарной погрешности вследствие случайного характера составляющих и отсутствия их корреляции:

$$\delta_{\text{неид}} = \sqrt{\delta_{\text{приб}}^2 + \delta_{\text{фок}}^2 + \delta_{\text{зонд}}^2} \quad (5)$$

Ниже приводится оценка составляющих.

Погрешность измерения амплитудных значений. Инструментальная погрешность $\delta_{\text{приб}}$ современных измерительных средств согласно паспортным данным для приборов СВЧ диапазона составляет величину порядка 0,2...0,3 дБ, т. е. 2,3...3,5%.

Погрешность, обусловленная отличием ДН антенны-зонда от изотропной. Возникновение указанной погрешности иллюстрирует рис. 10.

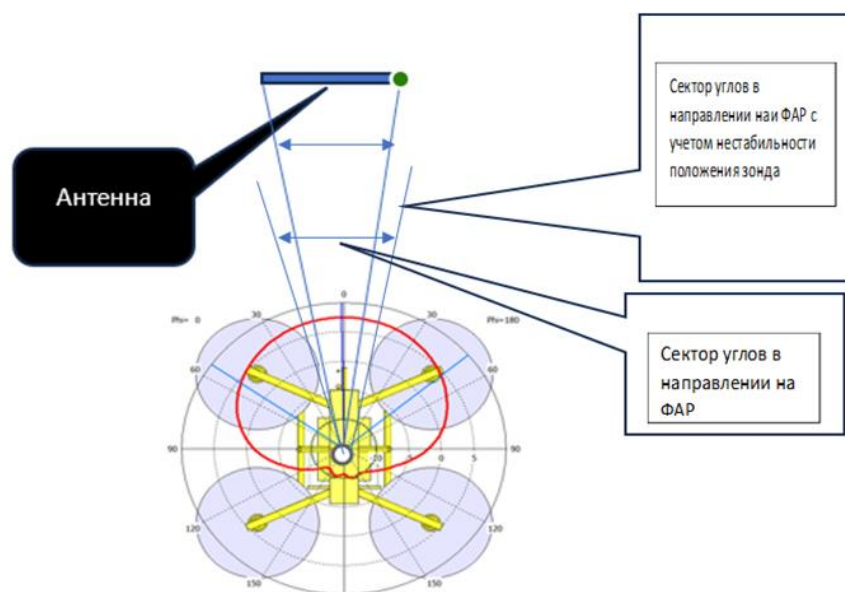


Рис. 10. К оценке влияния ДН антенны-зонда

При измерениях ДН методом перефокусировки (виртуальной вышки) в идеальном случае должна использоваться антенна-зонд с равномерной амплитудной ДН в секторе $\Delta\theta_{\text{антизм}} = \pm L_{\text{ант}}/2R_0$, увеличенном на значение погрешности угловой ориентации $\Delta\theta_{\text{ориент зонда}}$. Значение фокусного расстояния R_0 , как показано выше, должно быть не меньше нескольких размеров апертуры измеряемой антенны. При этом величина $\Delta\theta_{\text{антизм}}$ имеет порядок нескольких градусов. Отклонение ориентации антенны-зонда при использовании гиостабилизированной платформы также может не превышать нескольких градусов. Это означает, что ДН антенны-зонда должна обладать приемлемой неравномерностью в секторе $\Delta\theta_{\text{треб}} = \pm (\Delta\theta_{\text{антизм}} + \Delta\theta_{\text{ориент зонда}})$. Отличие ее от локально изотропной приводит к погрешности измерения методом «виртуальной вышки».

Оценить влияние неравномерности ДН антенны зонда можно, рассмотрев модель излучения сфокусированной апертуры при наличии соответствующего отклонения апертурного амплитудного распределения. На рис. 11 приведены результаты моделирования характеристик линейной антенны при наличии относительно малых погрешностей амплитудно-фазового распределения. Антенна длиной 100λ , АФР равномерное, синфазное. Неравномерность АФР моделируется случайной функцией с различными значениями радиуса корреляции и СКО.

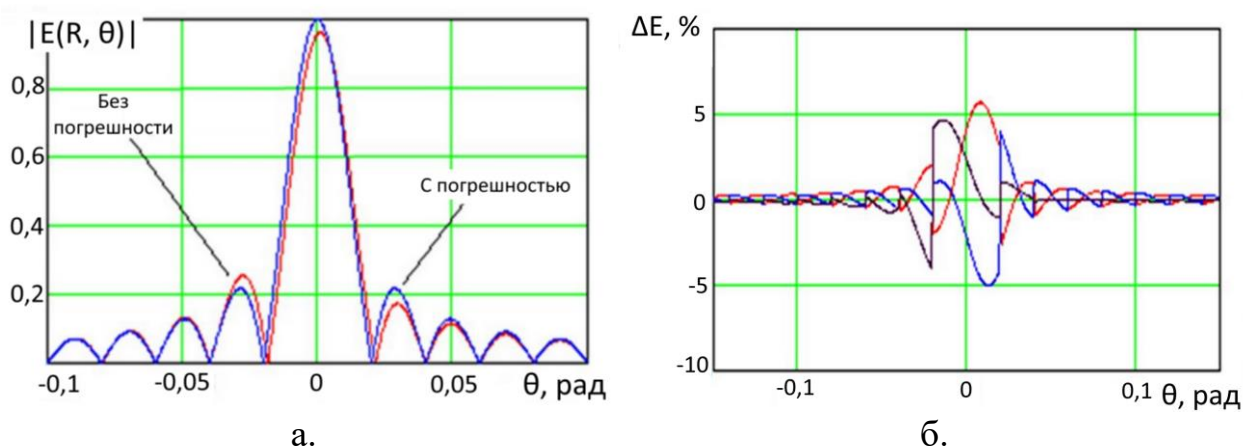


Рис. 11. Влияние малых отклонений АФР на пространственное распределение сфокусированного поля, а) распределение при $R/L=5$, отклонения амплитуды 5%, фазы 3° , б) реализации (3 шт.): относительное отклонение функции пространственного распределения при значении радиуса корреляции 0,2 размера апертуры

В ситуации, характерной для измерения ДДН крупноапертурных антенн, величина $\Delta\theta_{\text{треб}}$ не превышает 5...10 градусов. Как показывают расчеты, неравномерность ДН правильно спроектированной антенны-зонда даже с учетом влияния объекта установки составляет не более 0,2 дБ (т. е. 2,3%). Таким образом, можно считать установленным фактом отсутствие сильного влияния неравномерности ДН антенны-зонда на результаты измерения методом перефо-

кусировки. Расчетные оценки показывают на наличие отклонений значений измеренной ДДН, не превышающих 5% при неравномерности ДН не более нескольких десятых долей дБ.

Погрешность, обусловленная отличием положения антенны зонда от расчетного положения точки фокусировки. Величина ее, в конечном счете, определяется размерами сфокусированной области на расстоянии R измеряемой антенны. Типичная картина пространственного распределения амплитуды электромагнитного поля в зоне ближнего излученного поля показана на рис. 12.

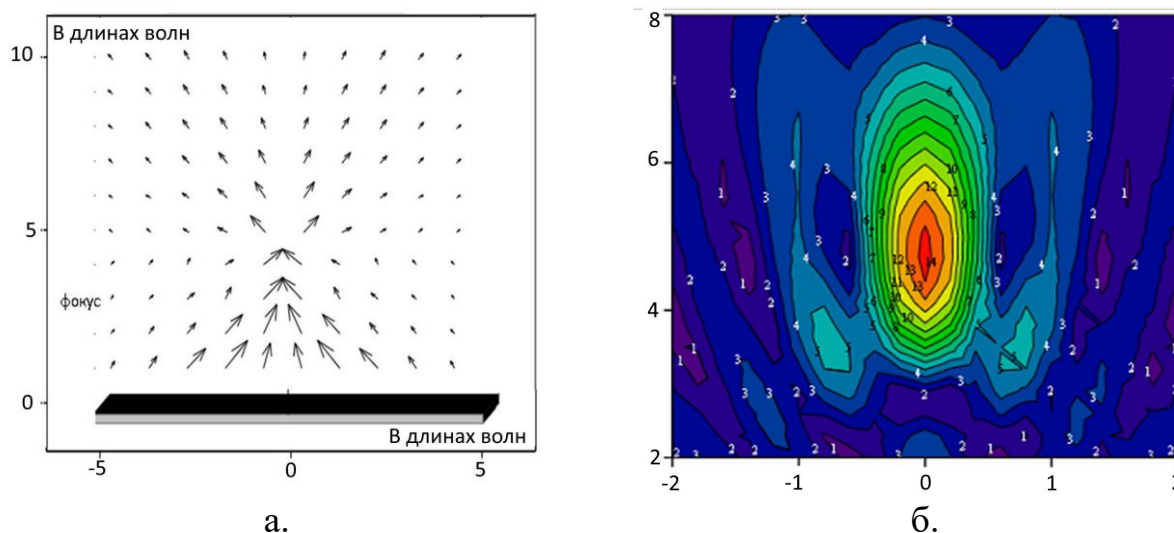


Рис. 12. Сфокусированное ЭМП: а) распределение вектора Пойнтинга; б) типичное распределение горизонтальной компоненты напряженности поля в вертикальной плоскости

В зоне ближнего излученного поля имеет место фокусировка по всем трем пространственным координатам [12]. Размеры сфокусированной области в направлении параллельном апертуре составляют величину порядка $\frac{R_0}{L_{ант}} \lambda$. В

поперечном – значительно больше. По мере удаления от апертуры происходит почти пропорциональное расширение в продольном и непропорциональное в поперечном направлении. При удалении от апертуры на величину порядка нескольких ее геометрических размеров свойство фокусировки постепенно утрачивается, а радиальная зависимость стремится к обратно пропорциональной. Это означает, что существенное значение имеет размер сфокусированной области в поперечном направлении, который для дальности $(500 \dots 1000)\lambda$ и апертуры с размерами $(50 \dots 100)\lambda$ составляет не менее значения $(5 \dots 10)\lambda$.

Поэтому, если система стабилизации обеспечивает достаточно малое отклонение положения антенны зонда от требуемого, оно не должно приводить к существенному изменению результатов измерений.

Оценить значение имеющей место погрешности, обусловленной отклонением положения антенны-зонда от требуемого, можно следующим образом.

Функция распределения напряженности поля в сфокусированном «пятне» представляется как $\cos \frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_{\text{ант}}}{R}$.

Соответственно, смещение центра сфокусированной области от «запланированного» положения приводит к изменению «измеренного» значения. Среднеквадратическое отклонение равно:

$$\delta_{\text{фок}} = \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_{\text{ант}}}{R}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

На рис. 13 приведены расчетные данные для различных размеров апертуры и фокусного расстояния.

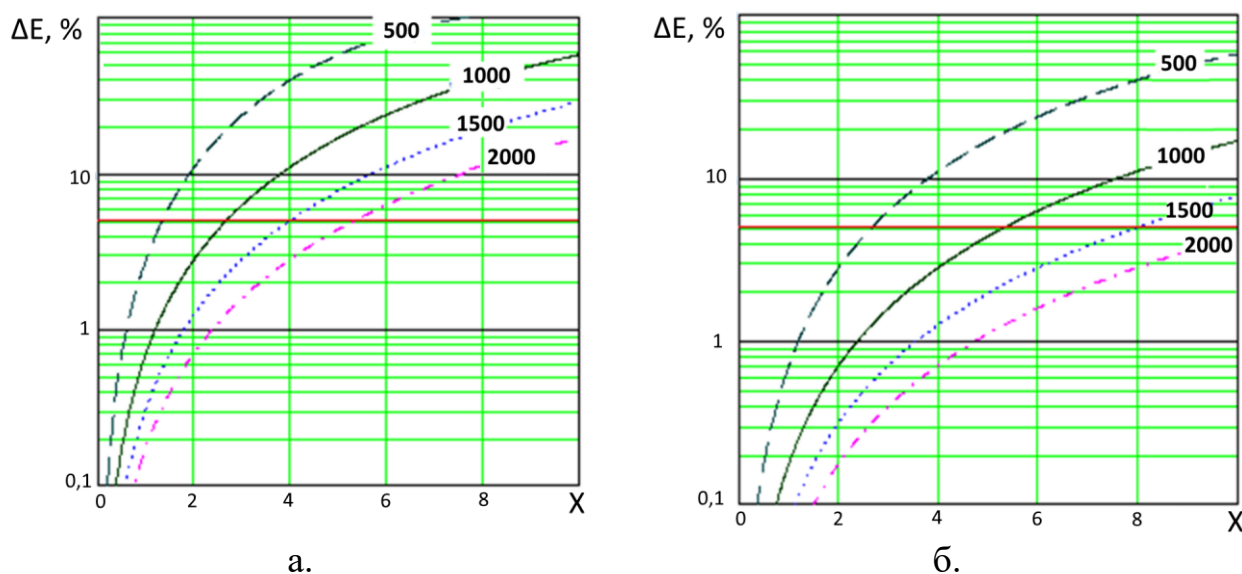


Рис. 13. Относительная погрешность значений «измеренной» ДДН от смещения положения точки фокуса при различных значения фокусного расстояния:
а) – для апертуры размером 100λ , б) – для апертуры размером 50λ

Как следует из данных приведенных оценок, рассматриваемая составляющая погрешности измерений имеет тенденцию к существенному снижению по мере увеличения фокусного расстояния. Это означает, в частности, что при организации измерения крупноапертурной антенны размером 100 длин волн и суммарного отклонении антенны зонда от требуемого положения не более 5λ , измерения должны проводиться на расстоянии не менее 2000 длин волн.

К аналогичным выводам приводит рассмотрение влияния погрешности, обусловленной отклонением антенны-зонда, на величину измеренного коэффициента усиления.

Из проведенных оценок погрешности измерения ДН методом «виртуальной вышки» следует, что в практических ситуациях измерений антенн с размерами апертуры не более 100 длин волн на расстоянии не менее 2000λ преобладающей является инструментальная погрешность используемых измерительных приборов.

Моделирование результатов измерений параметров ФАР методом перефокусировки в реальных условиях

Вышеприведенные результаты относятся к упрощенной модели ФАР в виде дискретной апертуры с заданным амплитудно-фазовым распределением. В уточненной модели должны быть положена в основу система реальных излучателей с заданным АФР на их входах. В общем случае, проведение аккуратного анализа антенной решетки требует учета как внешней, так и внутренней взаимной связи ее элементов. Что, в свою очередь, невозможно без наличия подробных данных как об используемых излучателях, так и распределительного устройства. При наличии достаточного объема данных, количественные расчеты могут быть реализованы на базе матричной теории антенн [13]. Для целей настоящей работы приемлемо ограничиться случаем отсутствия внутренних взаимных связей в распределительном устройстве. В этом случае функция пространственного распределения электромагнитного поля в промежуточной зоне, создаваемого антенной решеткой, может быть представлена как:

$$E_{AP}(R, \theta, \varphi, f) = \langle g(R, \theta, \varphi, f) | \cdot \dot{U}_{nao}(f) \rangle \quad (7)$$

где $|\dot{U}_{nao}(f)\rangle$ – амплитуды падающих волн на входах элементов решетки, $\langle g(R, \theta, \varphi, f) |$ – значения напряженности поля, создаваемого элементом при возбуждении падающей волной единичной амплитуды, R – расстояние, f – частота электромагнитного поля, θ, φ – угловые координаты.

Строго говоря, значения $g(R, \theta, \varphi, f)$ различны для всех элементов. Для крупноапертурных антенн допустимо приближение бесконечной решетки [13], когда игнорируется краевой эффект, все элементы считаются идентичными, а их характеристика определяется центральным (при единичном возбуждении) и несколькими ближайшими окружающими элементами, рассматриваемыми как пассивные.

В работах [14-15] расчеты ДН элемента бесконечной решетки выполнены «электродинамическими» методами с использованием свойств периодической системы. Подобные результаты получены для антенн в виде системы открытых концов волноводов различного сечения, системы щелей в проводящем экране и некоторых других простейших конфигураций. Для большинства реальных конфигураций строгие электродинамические расчеты неосуществимы. Для получения необходимых данных можно предложить следующий подход: строится по возможности точная геометрическая модель излучателя решетки и производится расчет ДН с использованием тех или иных процедур электродинамического моделирования (например, CST Microwave STUDIO, FEKO и др.). Затем строятся последовательно несколько моделей антенных решеток, в которых излучатель окружается постепенно увеличивающимся числом идентичных элементов (согласно реальной конструкции). В ходе моделирования оцениваются изменения в параметрах таких антенных решеток. Отсутствие существенных изменений в ДН антенной решетки позволяет установить ми-

нимальное число излучателей, взаимную связь между которыми необходимо учитывать.

При проведении расчетов в качестве демонстрационной модели элемента решетки взят симметричный полуволновый вибратор, расположенный на высоте $0,33\lambda$ над достаточно большим экраном ($5,7\lambda \times 5,7\lambda$) (рис. 14) в окружении аналогичных элементов с нулевым возбуждением. Расчеты проводились для случая дальней зоны.

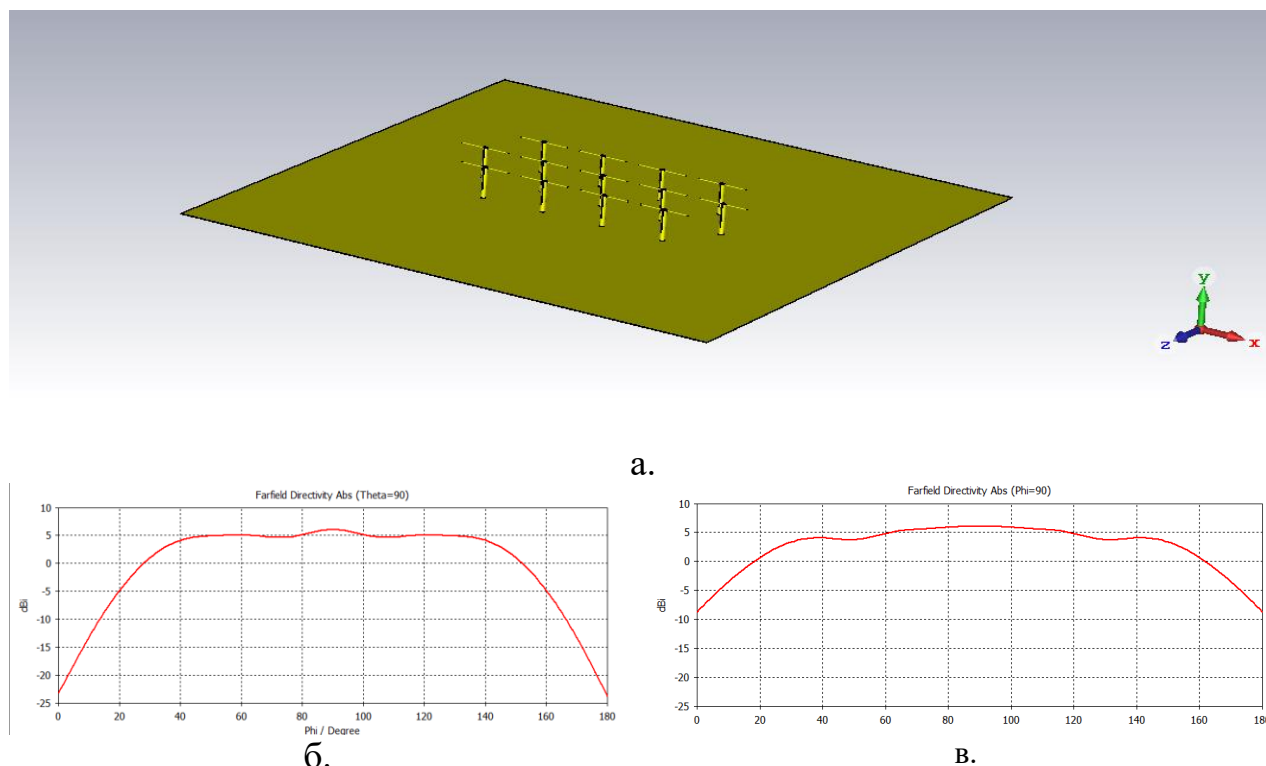


Рис. 14 Фрагмент антенной решетки: а) вид, б) и в) – диаграммы направленности в E и H плоскостях соответственно

Расчеты пространственного распределения проводились согласно (7) как

$$E_{AP}(R, R_0, \theta, \theta_0, \varphi, \varphi_0, f) = \left\langle \frac{e^{-jkR(\theta, \varphi)}}{R(\theta, \varphi)} \right\rangle \left| \dot{U}_{nad}(R_0, \theta_0, \varphi_0, f) \right\rangle g(R, \theta, \varphi, f), \quad (8)$$

где $\langle g(R, \theta, \varphi, f) \rangle$ – ДН излучателя в решетке как аппроксимация расчетной ДН излучателя в окружении пассивных элементов, $\left| \dot{U}_{nad}(R_0, \theta_0, \varphi_0, f) \right\rangle$ – амплитуды падающих волн на входах излучателей, обеспечивающих фокусировку в точку $(R_0, \theta_0, \varphi_0)$.

В процессе моделирования рассчитывались «измеренные» ДДН для различных значений направления главного максимума и фокусного расстояния. Рассчитывались пространственное распределение поля (ДДН) и его параметры – ширина луча и уровни боковых лепестков. Решетка с равномерным амплитудным распределением, шаг – половина длины волны. Размер апертуры антенны – $105\lambda \times 72\lambda$.

На рис. 15 приведены типичные «измеренные» диаграммы направленности. Результаты расчета основных параметров сведены в таблицу 1.

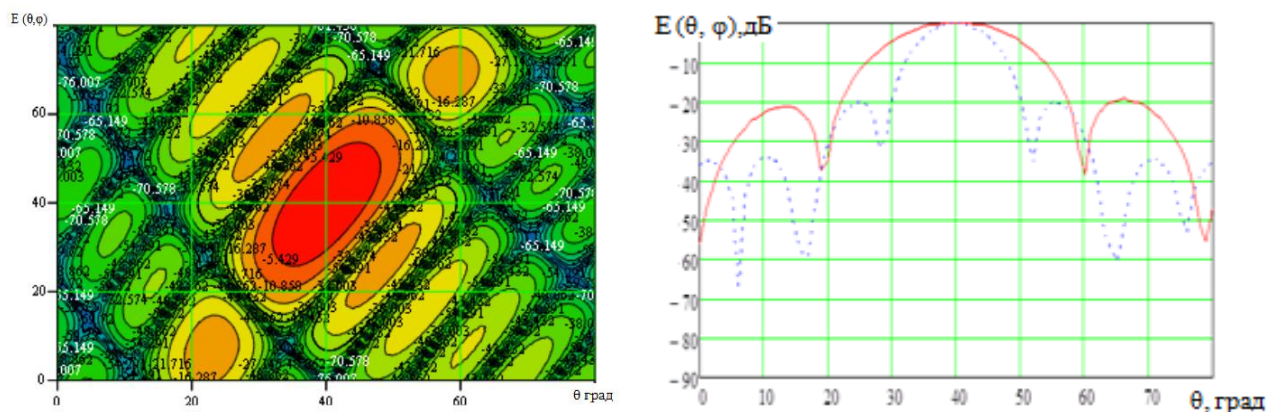


Рис. 15. Рассчитанные ДН ($\theta_0 = 30^\circ$, $\varphi_0 = 45^\circ$), фокусное расстояние 1400λ

Таблица 1 – Основные параметры «измеренных» ДДН

R/λ	5000	4200	3500	1400	700	350
$R/L_{\text{ант}}$	50	42	35	14	7	3.5
УБЛ 1	-13,29	-13,29	-13,29	-13,29	-13,27	-13,21
УБЛ 2	-18,38	-18,38	-18,38	-18,36	-18,28	-18
ШДН	0,319	0,319	0,319	0,319	0,32	0,322

Аналогичным образом моделировалось влияние погрешностей средств измерений и удержания позиции.

Моделирование крупноапертурной ФАР при различных значениях ориентации главного луча, фокусного расстояния, а также при наличии случайных отклонений положения точек фокусировки показало хорошее соответствие его результатов оценкам, полученных на основе упрощенных моделей, приведенных выше. Необходимо отметить и тот факт, что при отсутствии погрешностей местоположения и измерения амплитудных значений «измеренные» ДН и их параметры в дальней зоне и на расстояниях более 14 размеров апертуры не имеют практически значимых отличий в области главного луча и ближайших 2-3 боковых лепестков.

Практическая реализация

Реализация метода «виртуальной вышки» требует решения группы вопросов, включая выработку требований, выбор и реализацию комплекса программно-аппаратных средств, реализующих метод «виртуальной вышки»:

- выбор измерительных средств и их адаптация к условиям применения;
- выработка и требований к носителю с учетом специфических условий применения и их реализация;
- разработка и создание алгоритмического и программного обеспечения;
- метрологическое обеспечение;

- решение организационных вопросов, связанных с использованием воздушного пространства и радиочастотного ресурса.

В определенной степени при решении указанных вопросов может быть успешно использован ранее созданный задел – разработка комплекса измерения ДН наземных антенн облетным методом с использованием БПЛА [10] (рис. 2,3). Работы в этом направлении уже активно ведутся с использованием отечественных носителей и прецизионной измерительной аппаратуры (рис. 16).



Рис. 16. Измерительный комплекс АО РК «Вектор» 2023 г. а) и б) – аппаратура в ходе испытаний, в) БПЛА с бортовой аппаратурой в режиме зависания и прицеливания

Результаты решения перечисленных задач выходит за рамки настоящей работы и планируется к представлению в последующих публикациях.

Поскольку основным содержанием настоящей работы являются «электродинамические» аспекты предлагаемого метода измерений крупноапертурных антенн, в части практической реализации целесообразно остановиться подробнее на рассмотрении характеристик антенны, устанавливаемой на БПЛА на гиросtabilизированном подвесе.

Как отмечалось выше, указанная антенна должна обладать изотропной диаграммой направленности в секторе углов, соответствующих ракурсу измеряемой антенны с учетом угловых эволюций носителя. В силу известных причин необходим анализ направленных и, отчасти, импедансных характеристик слабонаправленной измерительной антенны с учетом влияния объекта установки. В современных реалиях наиболее естественным является проведение прямого электродинамического моделирования с использованием одного из эффективных пакетов, например, FEKO или CST MICROWAVE STUDIO.

Использована антенна типа Яги-Уда модели SIRIO WY 400-3N. Проведен анализ двух вариантов установки на гироплатформе беспилотного летательного аппарата:

- с пространственной стабилизацией только антенны;
- с пространственной стабилизацией антенны и приборного блока совместно.

В результате выполнения компьютерного электродинамического моделирования зондовой антенны, гиросtabilизатора, приборного блока и беспилотного летательного аппарата установлено следующее:

- используемая антенна обладает стабильными параметрами диаграммы направленности и согласования, слабо зависящими от объектов, находящихся за пределами главного лепестка диаграммы направленности;
- характеристики согласования и диаграммы направленности при размещении антенны и приборного блока на беспилотном летательном аппарате характеризуются слабыми изменениями от типа используемого материала корпуса носителя. По результатам моделирования можно сделать вывод, что реальная конструкция, выполненная как из проводящих, так и диэлектрических элементов не будет оказывать значительного влияния на параметры антенны при расположении элементов конструкции за пределами основного лепестка диаграммы направленности;
- моментальные пространственные положения винтов не оказывают значительного влияния на электродинамические параметры зондовой антенны;
- эволюции беспилотного воздушного судна по крену, тангажу и углу рыскания, характерных для гиросtabilизированного подвеса, не оказывают значительного влияния на характеристики согласования и диаграммы направленности зондовой антенны.

Проведенный анализ позволяет определить наилучший вариант установки антенны, при котором неравномерность и изменения параметров ее в пределах не оказывают недопустимого влияния на результаты измерения ДДН в пределах требуемого пространственного сектора углов.

Ниже приводятся иллюстрации на рис. 17-19 – вид модели носителя и данные электродинамического анализа.

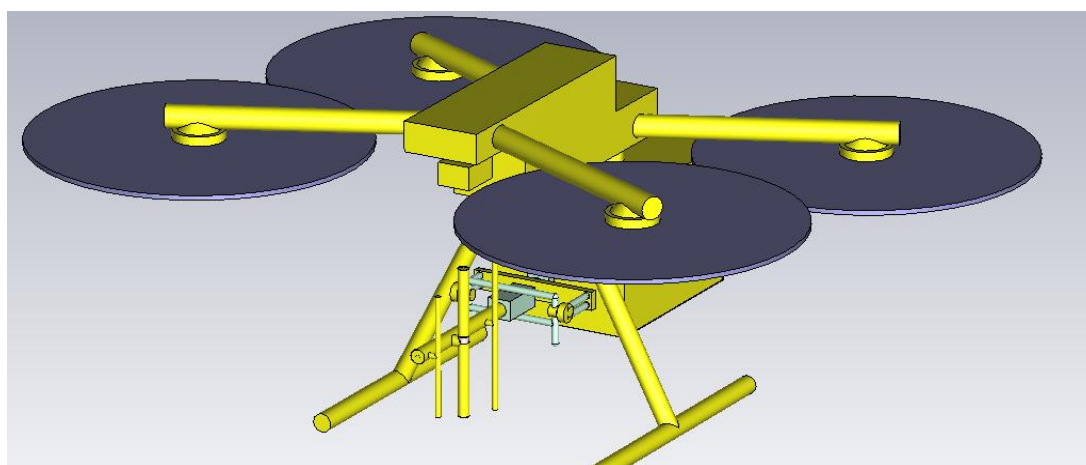


Рис. 17. Вертикально установленная зондовая антенна на беспилотном воздушном судне. Материал конструкции БПЛА – металл (алюминиевый сплав)

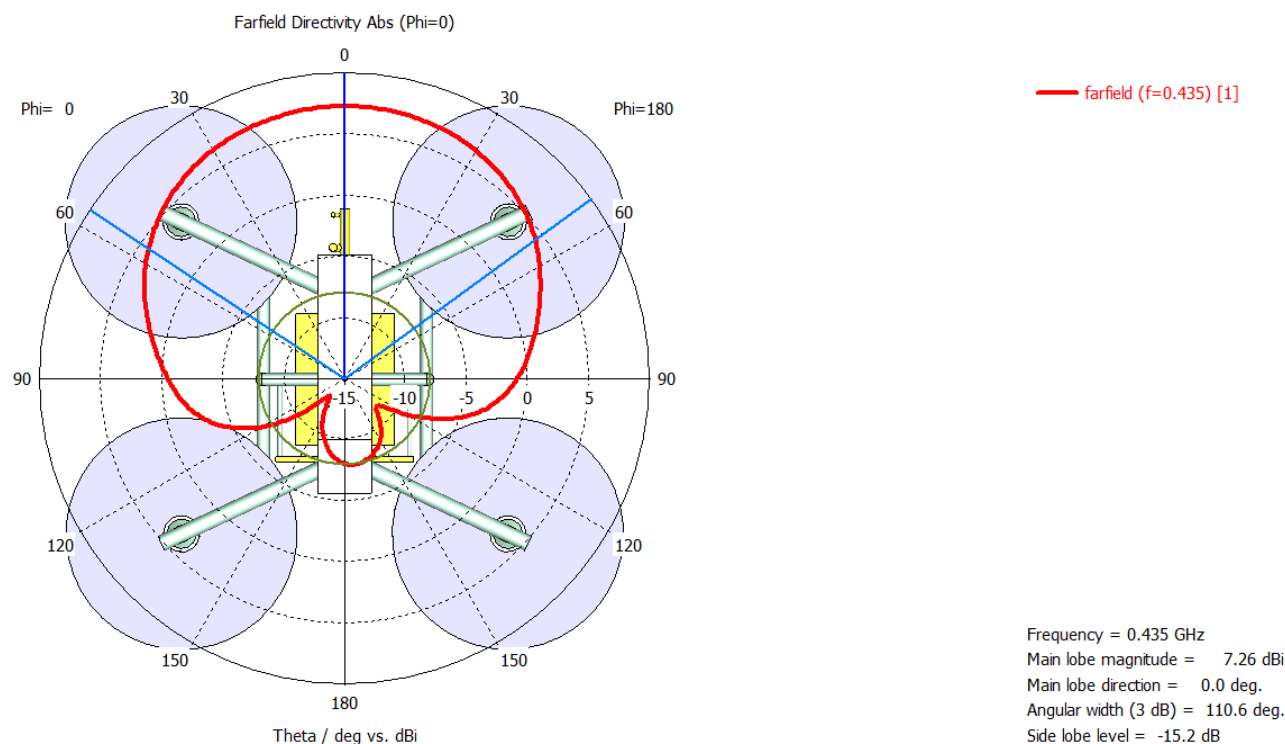


Рис. 18. Диаграмма направленности зондовой антенны в горизонтальной плоскости для случая зондовой антенны с приборным блоком и моделью беспилотного воздушного судна из диэлектрического материала

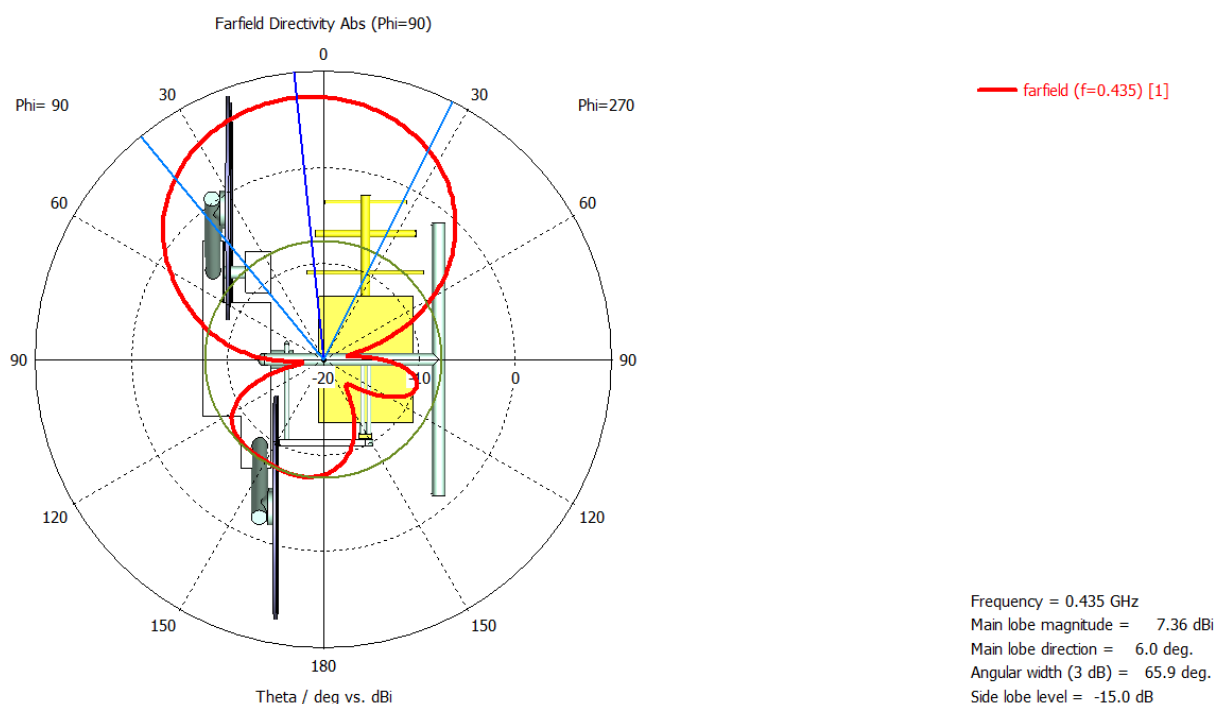


Рис. 19. Диаграмма направленности зондовой антенны в вертикальной плоскости для случая зондовой антенны с приборным блоком и моделью беспилотного воздушного судна из диэлектрического материала

Заключение

В представленной работе проведена оценка точностных показателей способа измерения характеристик направленности крупногабаритной ФАР в промежуточной зоне на базе использования беспилотной авиационной системы.

Полученные результаты, подтверждают возможность реализации предложенного метода «виртуальной вышки» на основе существующих измерительных средств, с приемлемыми метрологическими характеристиками.

Литература

1. Фрадин А. З., Рыжков Е. В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. – М.: Связь, 1972. – 352 с.
2. Методы измерений характеристик антенн СВЧ / под ред. Н.М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
3. Klassen V. I., Levitan B. A., Prosvirkin I. A., Topchiev S. A. Development of hardware and software complex for measurement of direction patterns of large aperture antennas with the use of unmanned aerial vehicle and GLONASS system // Proceedings of the 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication. Moscow, Russia, 29-30 November, 2016. pp. 80-85.
4. Классен В. И., Левитан Б. А., Просви́ркин И. А., Топчиев С. А. Способ измерения параметров направленности антенны с помощью БПЛА методом облета // Патент Российской Федерации №2626561, опубл. 28.07.2017. Бюл. № 22.
5. Казарян А. А. Способ измерения динамической диаграммы направленности ФАР // Авторское свидетельство СССР №1497587, опубл. 30.07.1989.
6. Левитан Б. А., Топчиев С. А., Фарбер В. Е., Эйсымонт М. В. Измерение динамических диаграмм направленности фазированных антенных решеток в процессе сопровождения радиолокационных объектов // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 4. С. 24–33.
7. Алексеев О. С., Гаврилова С. Е., Грибанов А. Н., Дорофеев А. Е., Макушкин И. Е., Мосейчук Г. Ф., Синани А. И. Динамические диаграммы направленности как средство определения характеристик ФАР // Альманах современной метрологии. 2019. № 2 (18). С. 80–119.
8. Грибанов А. Н., Гаврилова А. Е., Дорофеев А. Е., Мосейчук Г. Ф., Алексеев А. С. Метод измерения динамических ДН пассивных и активных ФАР // Вестник концерна «Алмаз – Антей». 2016. № 4. С. 38–42.
9. Ненартович Н. Э., Балагуровский В. А., Маничев А. О. Методы измерения параметров и диагностики отказов ФАР в ближней зоне без применения механических позиционеров // Вестник концерна «Алмаз – Антей». 2015. № 3. С. 36–42.

10. Балдин С. В., Гогоберидзе Т. О., Классен В. И., Левитан Б. А., Никитин М. В., Просвиркин И. А., Топчиев С. А. Метод виртуальной вышки для измерения диаграмм направленности крупноапертурных фазированных антенных решеток // Сборник трудов XX Всероссийской. молодежной научно-технической. конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». – М.: Мир науки. 2023. С. 24–29.

11. Гогоберидзе Т. О., Гогоберидзе Ю. Т., Классен В. И., Левитан Б. А., Литновский В. Я., Никитин М. В., Просвиркин И. А., Топчиев С. А. Способ измерения характеристик направленности фазированной антенной решетки в зоне Френеля с помощью беспилотной авиационной системы // Патент Российской Федерации №2797461, опубл. 06.06.2023. Бюл. № 16.

12. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Монография / под общ. ред. Н.А. Тестоедова и Ю.Е. Седельникова. – Красноярск: Сибирский Государственный аэрокосмический университет, 2015. – 308 с.

13. Сазонов Д. М. Многоэлементные антенные системы. Матричный подход. – М.: Радиотехника, 2015. 144 с.

14. Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток. – М.: Мир, 1974. – 458 с.

15. Банков С. Е. Электродинамический анализ бесконечной двумерной антенной решетки со случайными параметрами // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 12. doi: 10.30898/1684-1719.2023.12.19

References

1. Fradin A. Z., Ryzhkov E. V. *Izmerenie parametrov antenno-fidernyh ustrojstv* [Measurement of the Parameters of Antenna-Feeder Devices]. Moscow, Svyaz Publ., 1972. 352 p. (in Russian).

2. *Metody izmerenij harakteristik antenn SVCh* [Methods of Measuring the Characteristics of Microwave Antennas] / edited by Tseitlin N. M. Moscow, Radio and Communication Publ., 1984. 368 p. (in Russian).

3. Klassen V. I., Levitan B. A., Prosvirkin I. A., Topchiev S. A. Development of hardware and software complex for measurement of direction patterns of large aperture antennas with the use of unmanned aerial vehicle and GLONASS system *Proceedings of the 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication*, Moscow, Russia, 29-30 November 2016. pp. 80-85.

4. Klassen V. I., Levitan B. A., Prosvirkin I. A., Topchiev S. A. *Sposob izmerenija parametrov napravlennosti antennoy s pomoshh'yu BPLA metodom obleta* [Method of Antenna Directivity Measurement with UAV by Test Flight Method]. Patent Russia, no. 2626561, 2017.

5. Kazaryan A. A. *Sposob izmereniya dinamicheskoi diagrammi napravlennosti FAR* [Method of Measuring Dynamic Radiation Patterns of PAA]. Patent USSR, no. 1497587, 30.07.1989.

6. Levitan B. A., Topchiev S. A., Farber V. E., Eysymont M. V. *Izmerenie dinamicheskikh diagramm napravlenosti fazirovannykh antennoy reshetok v processe soprovozhdeniya radiolokacionnykh ob'ektov* [Measurement of Dynamic Direction Diagrams of Phased Antenna Arrays in Process of Radar Objects Tracking]. *Radiotekhnika*, 2024, vol. 88, no. 4, 24–33 p. (in Russian).

7. Alekseev O. S., Gavrilova S. E., Gribanov A. N., Dorofeev A. E., Makushkin I. E., Moseychuk G. F., Sinani A. I. *Dinamicheskie diagrammy napravlenosti kak sredstvo opredeleniya harakteristik FAR* [Dynamic Directional Diagrams as a Means of Determining the PAA Characteristics]. *Al'manah sovremennoj metrologii*, 2019, no. 2 (18), pp. 80–119 (in Russian).

8. Gribanov A. N., Gavrilova S. E., Dorofeev A. E., Moseychuk G. F., Alekseev O. S. *Metod izmerenija dinamicheskikh DN passivnykh i aktivnykh FAR* [A Method for Measuring Dynamic Radiation Patterns of Passive and Active Phased Antenna Arrays]. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz-Antej"*, 2016, no. 4, pp. 32–40 (in Russian).

9. Nenartovich N. E., Balagurovsky V. A., Manichev A. O. *Metody izmerenija parametrov i diagnostiki otkazov FAR v blizhnej zone bez primeneniya mehanicheskikh pozicionerov* [Methods of Measuring the Parameters and Fault Diagnosis Phased Antenna Array in the Near Field without the Use of Mechanical Positioners]. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz-Antej"*, 2015, no. 3, pp. 36–42 (in Russian).

10. Baldin S. V., Gogoberidze T. O., Klassen V. I., Levitan B. A., Nikitin M. V., Prosvirkin I. A., Topchiev S. A. *Metod virtual'noj vyshki dlja izmerenija diagramm napravlenosti krupnoaperturnykh fazirovannykh antennoy reshetok* [Virtual tower method for measuring radiation patterns of large aperture phased array antennas]. *Sbornik trudov XX Vserossiiskoj molodezhnoj nauchno-tehnichicheskoy konferencii "Radiolokacija i svjaz – perspektivnye tehnologii"* [Proceedings of the XX All-Russian Youth Scientific and Technical Conference "Radiolocation and Communication – Advanced Technologies"]. Moscow, Mir nauki. 2023, pp. 24–29 (in Russian).

11. Gogoberidze T. O., Gogoberidze Y. T., Klassen V. I., Levitan B. A., Litnovskij V. Y., Nikitin M. V., Prosvirkin I. A., Topchiev S. A. *Sposob izmerenija harakteristik napravlenosti fazirovannoj antennoj reshetki v zone Frenelja s pomoshh'ju bespilotnoj aviacionnoj sistemy* [Method for measuring the directivity characteristics of a phased array antenna in the Fresnel zone using an unmanned aerial system] Patent Russia no. 2797461 C1, published 06.09.2023, Bulletin No. 16.

12. Sedelnikov Yu. E., Testodov N. A., Vedenkin D. A., Danilov I. Yu., Potapova O. V., Romanov A. G., Fadeeva L. Yu., Choni Yu. I. *Antenny, sfokusirovannye v zone blizhnego izluchennogo polja. Moonografija* [Antennas focused in the zone of the near radiated field. Monography]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University Publ., 2015. 308 p. (in Russian).

13. Sazonov D. M. *Mnogojelementnye antennye sistemy. Matrichnyj podhod* [Multi-element antenna systems. Matrix approach]. Moscow, Radiotekhnika, 2015, 144 p. (in Russian).
14. Amitay N., Galindo V., Wu C. P. *Theory and Analysis of Phased Array Antennas*. New York, Wiley-Interscience, 1972. 443 p.
15. Bankov S. E. *E'lektrodinamicheskij analiz beskonechnoj dvumernoj antennoj reshetki so sluchajnymi parametrami* [Electromagnetic Analysis of Infinite 2D Antenna Array with Random Parameters]. *Journal of Radio Electronics*, 2023, no. 12. DOI: 10.30898/1684-1719.2023.12.19 (in Russian).

Статья поступила 29 мая 2025 г.

Информация об авторах

Веденькин Денис Андреевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Радиофотоники и микроволновых технологий. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. Область научных интересов: антенны, СВЧ устройства, электромагнитная совместимость, сети и системы передачи данных. E-mail: denis_ved@mail.ru

Адрес: 420111, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10.

Гогоберидзе Тенгиз Омарович – заместитель начальника департамента. АО Радиокompания «Вектор». Область научных интересов: техника СВЧ, радиорелейная связь, источники энергоснабжения, измерительная техника. E-mail: gto@vector.ru

Классен Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных и телекоммуникационных систем. Чистопольский филиал Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ. Генеральный директор. АО Радиокompания «Вектор». Область научных интересов: теория и техника антенн, спутниковая связь, искусственный интеллект, системы безопасности. E-mail: kvi@vector.ru

Адрес: 422980, Россия, Республика Татарстан, г. Чистополь, ул. К. Маркса, д. 135.

Левитан Борис Аркадьевич – кандидат технических наук, заведующий базовой кафедрой «Радиофизика и техническая кибернетика». Московский физико-технический институт. Генеральный директор. ПАО «Радиофизика». Область научных интересов: радиолокация, системы спутниковой связи, антенная техника, телеметрия. E-mail: mail@radiofizika.ru

Седельников Юрий Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиофотоники и микроволновых технологий. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. Область научных интересов: антенны, СВЧ устройства, электромагнитная совместимость. E-mail: sedhome2013@yandex.ru

Адрес: 420111, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10.

Топчиев Сергей Александрович – кандидат технических наук. Генеральный конструктор. ПАО «Радиофизика». Область научных интересов: радиолокация, системы спутниковой связи, антенная техника, СВЧ устройства. E-mail: mail@radiofizika.ru

Адрес: 125363, Россия, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10.

Virtual Tower Method in the Task of Measuring Dynamic Radiation Patterns of Large Aperture PAAs

D. A. Vedenkin, T. O. Gogoberidze, V. I. Klassen,
B. A. Levitan, Y. E. Sedelnikov, S. A. Topchiev

Problem statement. At present, long-range radar detection systems play an increasingly important role in the country's security system. The most important element of these systems, which largely determines their technical and tactical performance, are large-aperture antenna systems, which use active phased antenna arrays (APAA) and digital antenna arrays (DAA). Measuring their characteristics is a complex task, both technically and organizationally. Traditional methods of antenna measurements are often inapplicable. The objective of this work is to theoretically substantiate a new method for measuring the characteristics of large-aperture phased antenna arrays (PAA), which allows for a significant reduction in the measurement time and cost. **The purpose** is to assess the influence of factors determining the main accuracy indicators and to determine the conditions under which acceptable metrological characteristics of the modified flyby method are ensured when using a multi-rotor type unmanned aerial vehicle (UAV), which is already available today, as a radiosonde carrier. **Methods.** In terms of approaches to ensuring the required indicators, the following were used: analytical and numerical methods of applied antenna theory, a computational experiment using proven software tools. **Novelty** of the work lies in the proposal of a method for monitoring the parameters of large-aperture antennas using a flyby method with measurements in the zone of the near radiated field. **Result.** The possibility of measuring the parameters of large-aperture phased antenna arrays by the flyby method in the intermediate radiation zone of the antenna by the refocusing method using existing measuring equipment with accuracy indicators that are practically not inferior to the indicators of traditional methods of antenna measurements in the far zone is demonstrated. **Practical relevance** of the work lies in expanding the potential of the flyby method of near-field antenna measurements of large-aperture antennas using the virtual tower method.

Key words: phased antenna array, digital antenna array, antenna measurements, dynamic radiation pattern, flyby method, refocusing, virtual tower method, unmanned aerial vehicle.

Information about Authors

Denis Andreevich Vedenkin – Ph.D. of Engineering Sciences. Docent. Associate Professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Field of research: antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility, networks and data transmission systems. E-mail: denis_ved@mail.ru

Tengiz Omarovich Gogoberidze – Deputy Head of Department. Joint stock company “Vector Radio Company”. Field of research: microwave technology, radio relay systems, power supplies, measuring technology. E-mail: gto@vector.ru

Victor Ivanovich Klassen – D.Sc. of Engineering Sciences, Full Professor, Head of Department of Computer and Telecommunication Systems, Chistopol Branch of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. General Director. Joint stock company “Vector Radio Company”. Field of

research: antenna theory and engineering, satellite communication, artificial intelligence, security systems. E-mail: kvi@vector.ru

Address: 422980, Russia, Republic of Tatarstan, Chistopol, K. Marx str., 135.

Boris Arkadjevich Levitan – Ph.D. of Engineering Sciences, Head of Joint Department of Radiophysics and Engineering Cybernetics. Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). General Director. Public joint-stock company “Radiofizika”. Field of research: radar technology, satellite communication, antenna engineering, telemetry. E-mail: mail@radiofizika.ru

Yury Evgenyevich Sedelnikov – D.Sc. of Engineering Sciences. Full Professor. Professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Field of research: antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility. E-mail: sedhome2013@yandex.ru

Address: 420111, Russia, Kazan, Karl Marx str., 10.

Sergey Aleksandrovich Topchiev – Ph.D. of Engineering Sciences. General Designer. Public joint-stock company “Radiofizika”. Field of research: radar technology, satellite communication, antenna engineering, microwave devices. E-mail: mail@radiofizika.ru

Address: 125363, Russia, Moscow, Geroyev Panfilovtsev str., 10.