

Испытания антенных решеток бортовых радиолокационных систем в антенном измерительно-вычислительном комплексе

Добычина Е.М.*, **Снастин М.В.****, **Обухов А.Е.*****, **Харалгин С.В.******

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: dem5577@yandex.ru*

***e-mail: Mexanizmys@ya.ru*

****e-mail: obuxoff@gmail.com*

*****e-mail: hsvl92@mail.ru*

Аннотация

Антенна на борту летательного аппарата должна соответствовать определенным требованиям: иметь небольшие размеры, не ухудшать его аэродинамических свойств, работать в тяжелых климатических условиях. Волноводно-щелевая антенная решетка была разработана и измерена в безэховой камере. Результаты испытаний хорошо согласуются с результатами, полученными моделированием и соответствуют требованиям технических условий.

Ключевые слова: Безэховая камера, сканер ближнего поля, диаграмма направленности антенны, коэффициент усиления антенны

1. Введение

Многоэлементные фазированные антенные решетки с пространственно-временной обработкой информации для решения задач радиолокации, радионавигации, радиотехнической разведки, радиоэлектронной борьбы и

телекоммуникаций являются неотъемлемой частью радиоэлектронных систем летательных аппаратов (ЛА). В настоящее время активно исследуются возможности использования различных методов пространственно-временной обработки сигналов для расширения диапазона рабочих частот, а также цифровой обработки для повышения помехозащищенности системы.

Опытные образцы антенных решеток (АР) для многофункциональных бортовых радиолокационных систем (РЛС) были рассчитаны, промоделированы и изготовлены. Измерения их основных характеристик были проведены в автоматизированном измерительно-вычислительном комплексе (АИВК) на базе экранированной безэховой камеры (БЭК) [1], позволяющем проводить измерения радиотехнических характеристик антенных систем в диапазоне частот от 0,8 до 40 ГГц.

2. Характеристики АИВК

Измерения характеристик антенн традиционно проводятся на антенных полигонах, где пытаются обеспечить условия работы в дальней зоне, даже для больших АР. Основной трудностью при проведении экспериментальных исследований таким способом является многолучевой характер распространения радиоволн, обусловленный влиянием подстилающей поверхности - земли. В результате связь между измеряемой и измерительной антеннами осуществляется не только прямым лучом, соединяющим их фазовые центры, но и лучом, отраженным от поверхности земли.

Использование безэховых камер позволяет резко сократить или полностью исключить натурные испытания на полигонах, что приводит к значительной

экономии средств и времени на разработку сложной радиотехнической аппаратуры [2]. Такие БЭК должны соответствовать высоким требованиям по уровню экранирования и коэффициенту безэховости в рабочей зоне проведения измерений (Табл. 1).

Таблица 1
Параметры БЭК

Частотный диапазон	800 МГц –40 ГГц
Коэффициент ослабления (экранирования) БЭК и дверей БЭК, не менее	90 дБ на частотах от 100 кГц до 40 ГГц
Коэффициент безэховости (уровень отраженного сигнала) при нормальном падении плоской волны и при падении плоской волны под углом 45°, не более	минус 30 дБ на частотах от 1 ГГц до 40 ГГц; минус 20 дБ на частотах от 0,8 ГГц до 1 ГГц
Электрогерметичный экран	состоит из стальных панелей, соединенных методом сварки

Для проведения автоматизированных измерений параметров антенн необходимо специализированное программное обеспечение. Оно позволяет осуществлять: автоматизированный сбор данных с измерительных устройств; управление измерительными приборами и приводами смещений, как во время проведения измерений параметров антенн, так и вне автоматизированных измерений; обработку данных, расчет параметров измеряемых антенн; визуализацию и систематизацию результатов измерений и анализа параметров антенн. Также должна быть обеспечена возможность автоматизированной проверки работоспособности АИВК с выводом отчёта о состоянии физических устройств и систем программной части.

Фотография используемой БЭК с потолком и стенами, покрытыми радиопоглощающим покрытием, представлена на рисунке 1, помещение с рабочими местами (РМ) операторов показано на рисунке 2.



Рисунок 1. Безэховая камера.



Рисунок 2. РМ операторов.

Лабораторный комплекс обеспечивает проведение автоматизированных измерений радиотехнических характеристик антенн, антенных систем и СВЧ устройств в широком диапазоне частот, в ближней и дальней зоне в том числе:

- амплитудных диаграмм направленности (ДН) антенн с линейной и эллиптической поляризациями;
- фазовых ДН антенн с линейной и эллиптической поляризациями;
- амплитудных распределений по апертуре антенны, АР;
- фазовых распределений по апертуре антенны, АР;
- коэффициентов усиления (КУ) АР, антенн с линейной и эллиптической поляризациями;
- коэффициентов эллиптичности антенн с эллиптической поляризацией;
- координат фазового центра антенн, АР;
- коэффициента стоячей волны по напряженности поля (КСВН) антенн и СВЧ

устройств.

Антенные измерения проводятся с помощью векторного анализатора цепей. Для исследования амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля в раскрыве исследуемых антенн используется планарный сканер (Табл.2.), позволяющий проводить измерения в ближней зоне (Рис.3).

Таблица 2
Характеристики сканера

Размер рабочей зоны сканера, не менее	1,5 м x 1,5 м x 1 м
Число программно управляемых координат сканера, не менее	4 (X, Y, Z, P)
Точность позиционирования антенны-зонда сканера по линейным координатам	$\pm 0,1$ мм
Точность позиционирования антенны-зонда сканера по угловым координатам	$\pm 0,15$ град

Для размещения антенн и антенных решеток при измерениях пространственных диаграмм направленности и поляризационных характеристик в дальней зоне (Рис.3) используется опорно-поворотное устройство (ОПУ) (Табл.3).

Таблица 3
Характеристики ОПУ

Максимальная нагрузка на ОПУ	до $80 \text{ кг} \times 1 \text{ м}^2$.
Максимальная нагрузка на стол ОПУ	до $200 \text{ кг} \times 4 \text{ м}^2$.
Приспособление для крепления малоразмерных антенн, нагрузка	до $15 \text{ кг} \times 0,5 \text{ м}^2$.
Число программно управляемых координат ОПУ	3 (AZ, EV, P).
Точность позиционирования	$\pm 0,15$ гр. для AZ; EV; $\pm 0,15$ гр. для P.
ОПУ по линейной координате Z	$\pm 0,1$ мм.
Диапазон изменения угловых положений ОПУ, не менее	в азимутальной плоскости: ± 180 гр.; в плоскости поляризации: ± 180 гр.; в угломестной плоскости: ± 30 гр.

АИВК оборудован системами жизнеобеспечения, видеонаблюдения и контроля доступа. Аппаратура для проведения автоматизированных измерений находится в отдельном экранированном помещении (Рис.4).

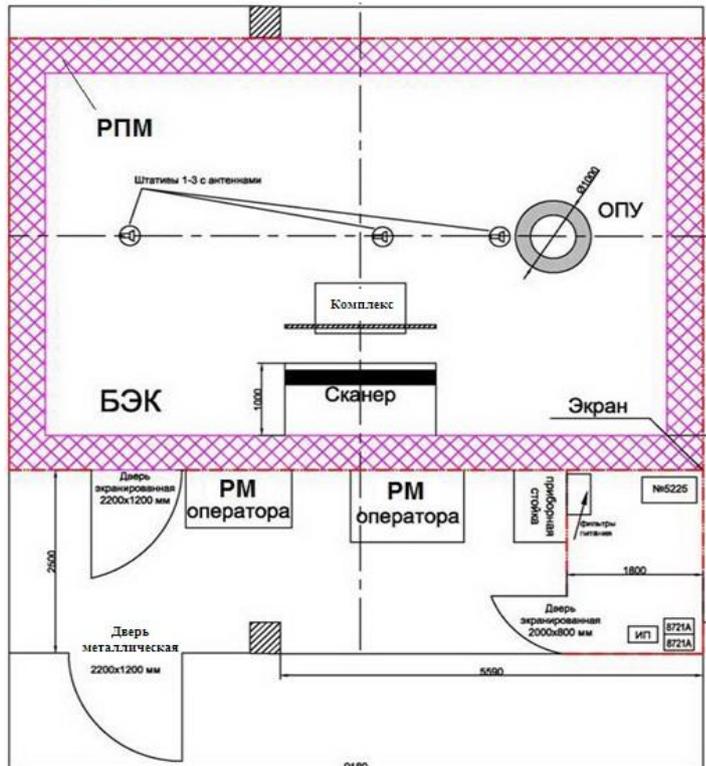


Рисунок 3. Схема АИВК.



Рисунок 4. Аппаратное помещение.

В настоящее время разработаны методики проведения антенных измерений с учетом новейших технических решений, примененных в комплексе (Рис.5). Эти решения позволяют проводить измерения характеристик антенных систем в полосе 800 МГц ÷ 40 ГГц за один цикл, без дополнительной перенастройки аппаратуры в полностью автоматическом режиме.



Рисунок 5. БЭК с измерительным оборудованием.

Результаты измерений поступают в компьютер и могут быть использованы как для составления протоколов, так и для продолжения расчетов или моделирования.

3. Испытания в АИВК бортовых АР

В БЭК могут проводиться различные исследования, например, могут быть измерены поляризационные характеристики различных объектов; проведены экспериментальные оценки отражательных свойств (эффективной площади рассеяния [3]) предметов сложной формы при изменении их ориентации относительно измерительных антенн, в полосе частот для разных поляризаций падающей и принимаемой радиоволн. В рамках этой статьи показаны возможности АИВК для измерения высокочастотных трактов и характеристик направленности волноводно-щелевых антенных решеток (ВЦАР) сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн.

Наличие указанного измерительного оборудования позволило после проведения моделирования [4], разработки конструкторской документации и изготовления опытных образцов АР провести их испытания. Исследование характеристик решеток проводилось на основе планарного сканирования

электромагнитного поля в ближней зоне антенны с последующим пересчетом в дальнюю зону [5]. Состав оборудования для проведения измерений показан на рисунке 6. Тестируемая ВЦАР устанавливалась на штатив перед планарным сканером ближнего поля на расстоянии $2\div 3\lambda$, где λ – длина волны, от измерительного зонда, расположенного на сканере. Измерительная установка с ВЦАР миллиметрового диапазона представлена на рисунке 7.

Измерение S-параметров в широком диапазоне частот осуществлялось с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ). Весь процесс проходил в полностью автоматизированном режиме и управлялся с ПК оператора, оснащенного персональным компьютером (ПК) со специализированным программным обеспечением.

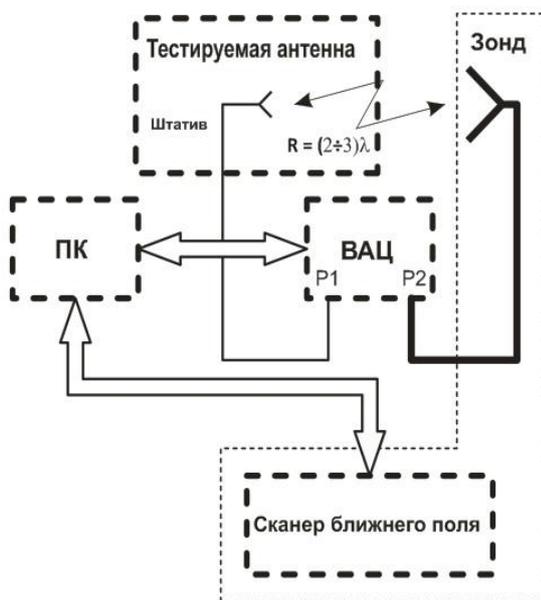


Рисунок 6. Схема измерительного стенда.



Рисунок 7. ВЦАР перед сканером в БЭК.

Результаты измерений представляют собой амплитудное распределение в плоскости сканирования в ближней зоне исследуемой антенны (Рис. 8, Рис. 9). При необходимости можно использовать и фазовое распределение.

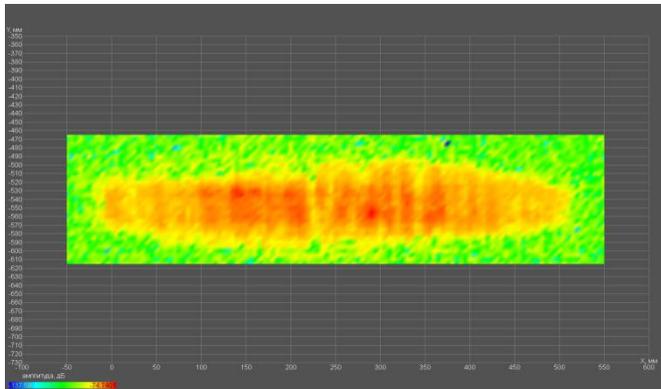


Рисунок 8. Амплитудное распределение.

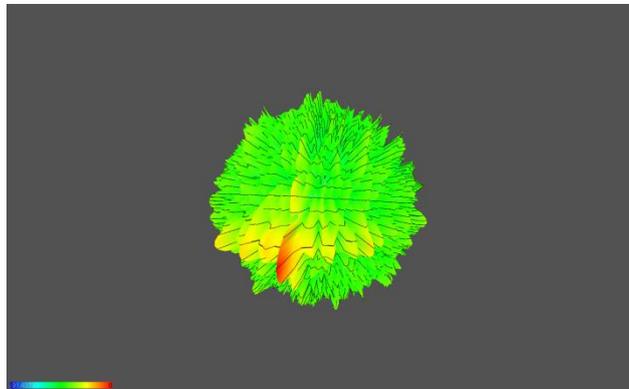


Рисунок 9. Трехмерное представление амплитудного распределения.

Пересчет в дальнюю зону производится с помощью известных алгоритмов [5]. Результаты пересчета экспериментальных распределений в дальнюю зону в виде амплитудных ДН АР миллиметрового диапазона показаны на рисунке 10 и рисунке 11.

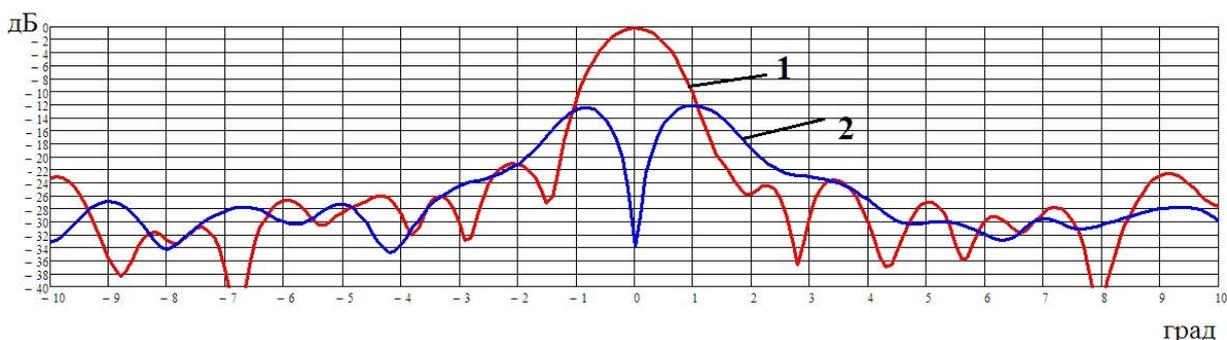


Рисунок 10. ДН в азимутальной плоскости: 1-суммарный канал АР; 2-разностный канал.

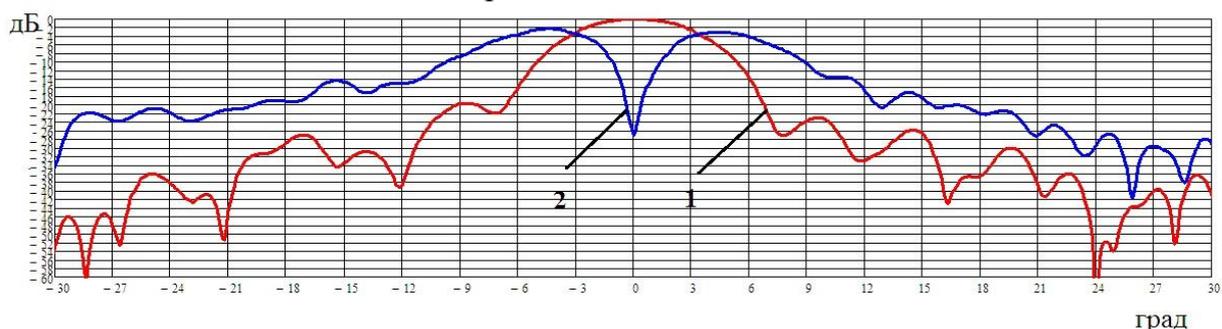


Рисунок 11. ДН в угломестной плоскости: 1-суммарный канал АР;
2-разностный канал.

Точность пересчёта результатов измерений планарного сканирования в угловые координаты составляет $0,1^\circ$. Результаты измерений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) на входе АР показаны на рисунке 12.

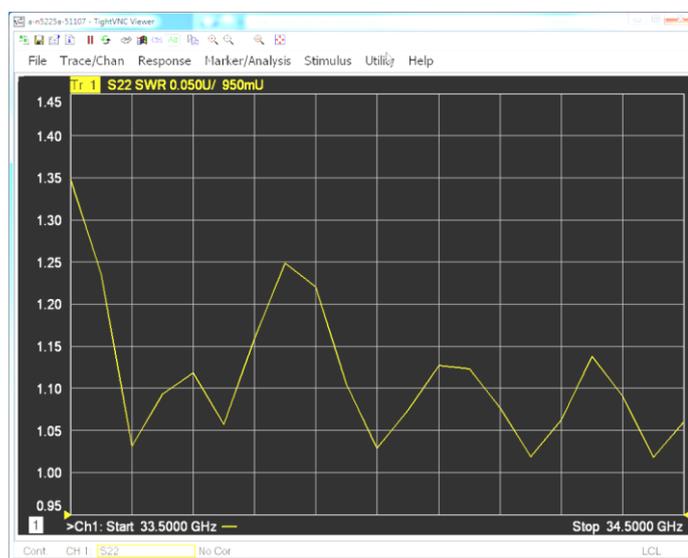


Рисунок 12. КСВН в диапазоне частот.

Для верификации результатов измерений в ближнем поле миллиметровой антенны проведены сравнения с аналогичными данными, полученными при испытаниях той же АР на антенном полигоне (АП) в дальней зоне. Сравнение основных параметров представлено в таблице 4.

Таблица 4
Результаты испытаний

№ пп	Название параметра	Измеренное на АП		Измеренное в БЭК	
		пл. Н	пл. Е	пл. Н	пл. Е
1	Коэффициент усиления, дБ	30,4	30,4	31,1	31,1
2	Ширина Σ ДН, °	6,2	1,16	6,4	1,17
3	Максимальный УБЛ, дБ	-23,2	-21,0	-22,9	-20,6
4	Относительная глубина нуля разностной ДН, дБ	-28,0	-35,0	-27,1	-33,9
5	КСВн на входе АР	1,55		1,35	

Полученные путем пересчета из ближней зоны в дальнюю ширина суммарной ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях, уровень нуля разностных характеристик, а также усиление АР и коэффициент стоячей волны по напряжению от суммарного входа антенны соответствуют аналогичным характеристикам, измеренным непосредственно в дальней зоне с точностью используемых средств измерения, что подтверждает достоверность проведенных измерений в БЭК.

В ходе выполнения опытно-конструкторских работ также была изготовлена и прошла испытания в АИВК ВЦАР сантиметрового диапазона, фотография которой представлена на рисунке 13.

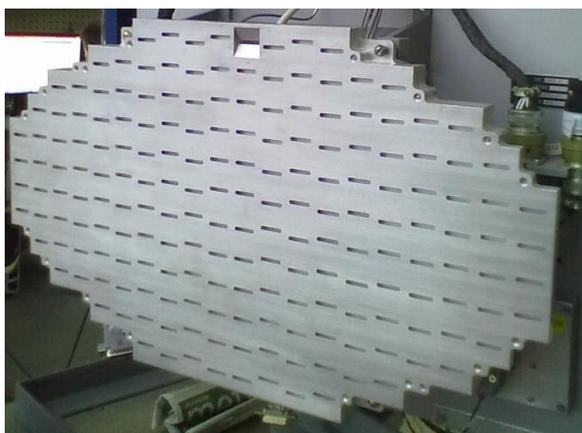


Рисунок 13. ВЦАР сантиметрового диапазона длин волн.

Результаты пересчета экспериментально снятых амплитудно-фазовых распределений в дальнюю зону в виде амплитудных ДН АР сантиметрового диапазона показаны на рисунках 14 ÷ 17.

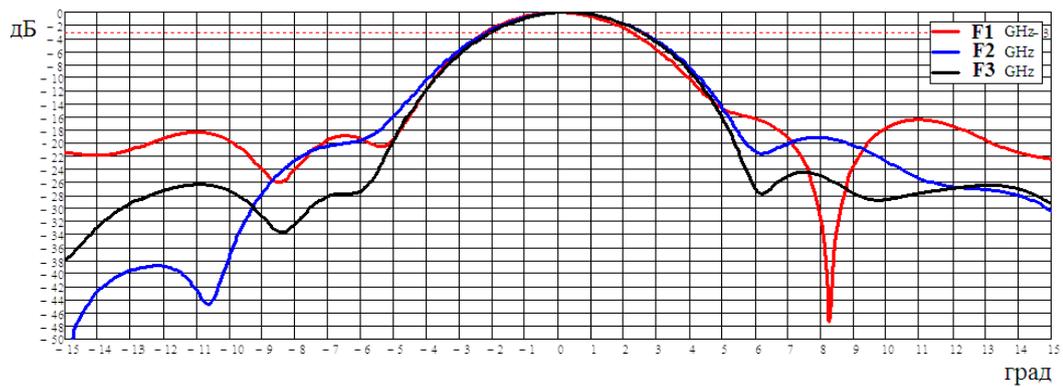


Рисунок 14. Суммарная ДН в азимутальной плоскости на частотах **F1, F2, F3**.

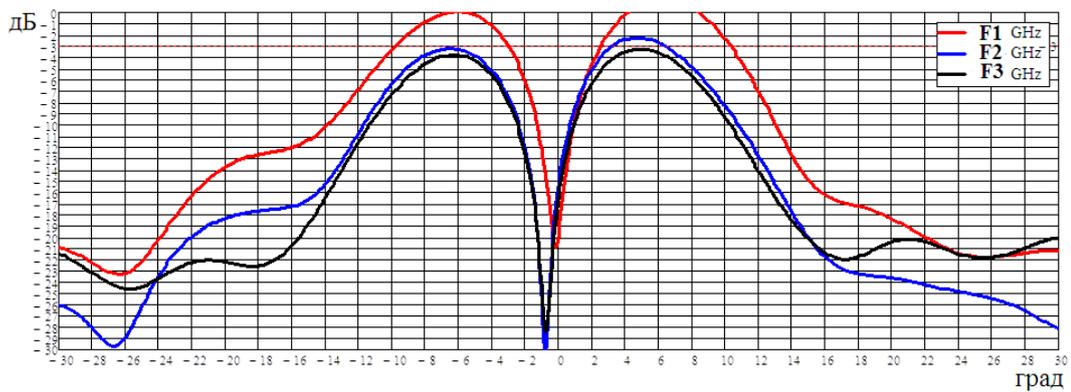


Рисунок 15. Разностная ДН в азимутальной плоскости на частотах **F1, F2, F3**.

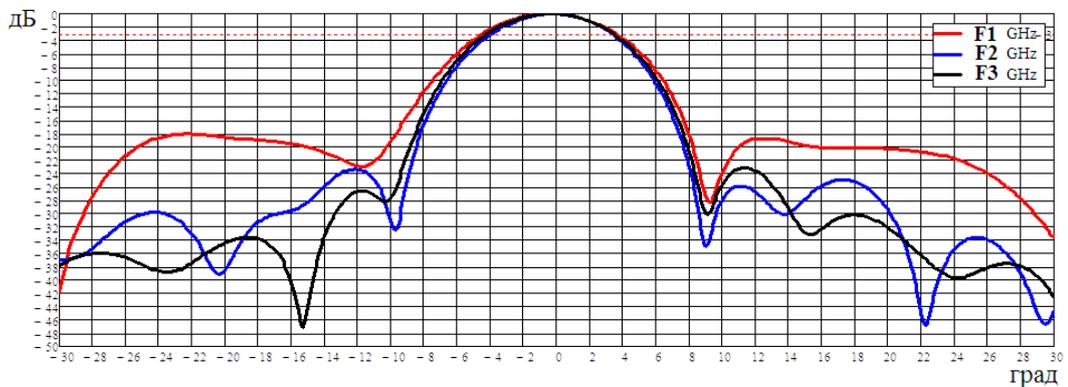


Рисунок 16. Суммарная ДН в угломерной плоскости на частотах **F1, F2, F3**.

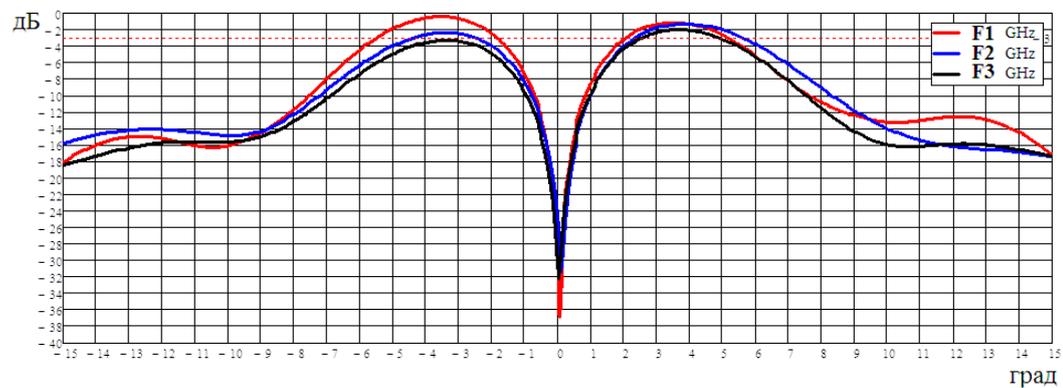


Рисунок 17. Разностная ДН в угломерной плоскости на частотах **F1, F2, F3**.

Измерения показали, что в азимутальной плоскости в полосе частот 5% ширина суммарной ДН меняется максимум на $0,3^{\circ}$; УБЛ варьируется от минус 19 дБ до минус 26 дБ, а глубина минимума разностной ДН от минус 21 дБ до минус 31 дБ, относительно максимума суммарной ДН.

В угломестной плоскости в полосе частот 5% ширина суммарной ДН меняется уже на $0,8^{\circ}$; УБЛ варьируется от минус 18 дБ до минус 26 дБ, а глубина минимума разностной ДН от минус 30 дБ до минус 37 дБ, относительно максимума суммарной ДН. Причем в азимутальной плоскости наблюдается частотная зависимость положения минимума разностной ДН, в полосе 5% отклонение составляет около 1° . В угломестной плоскости отклонение минимума оставляет доли градуса и соизмеримо с точностными характеристиками измерительных приборов.

В АИВК используется установка (рис. 18) для измерения коэффициента усиления (КУ) антенны методом отражения или плоского экрана [6]. Его идея заключается в сравнении коэффициентов отражения от входа согласованной с фидером измеряемой АР, излучающей в свободное пространство и от входа этой же решетки, когда перед ней на некотором расстоянии R ставится отражающая поверхность – плоский экран или рефлектор (рис. 19). Нарушение согласования объясняется тем, что под влиянием плоского экрана изменяется входное сопротивление передающей антенны, к первоначальному сопротивлению добавляется наведённое сопротивление от экрана, которое эквивалентно наведённому сопротивлению от такой же антенны, как исследуемая, но расположенной на расстоянии $2R$ и имеющей обратную фазу колебаний.

Результаты измерений КУ исследуемым методом не зависят от влияния земной поверхности, так как расстояние от антенн до рефлектора мало, и отражением волны можно пренебречь. Однако, они зависят от степени согласования АР с питающим фидером, а также от возможных переотражений от стен камеры, в которой проходят измерения.

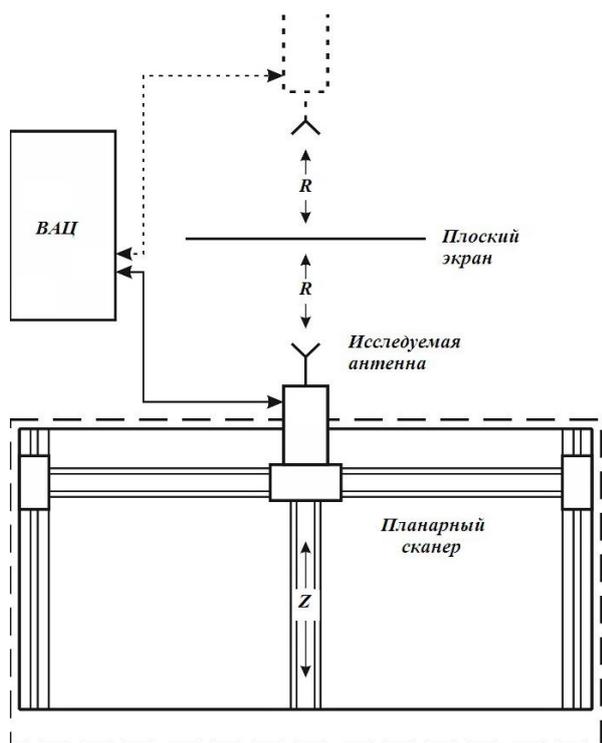


Рисунок 18. Схема измерений методом отражения.

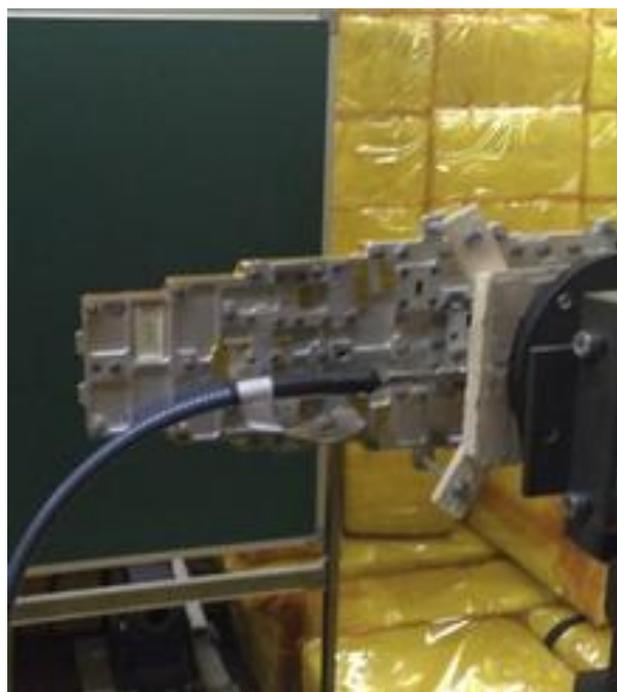


Рисунок 19. ВЦАР перед плоским экраном в БЭК.

Использовались соотношения для коэффициента отражения от входа антенны в случае рассогласования антенны и фидера и результирующее уравнение для КУ (G)

$$G = \frac{|\Gamma_R - \Gamma_0|}{1 - |\Gamma_0|^2} 4kR,$$

где Γ_R – коэффициент отражения, измеренный с рефлектором перед антенной,

Γ_0 – коэффициент отражения, измеренный без рефлектора.

Испытуемая антенна размещалась на планарном сканере (рис.19) и изменение расстояния от неё до рефлектора осуществлялось с помощью высокоточного перемещения вдоль оси Z сканера. Измерение комплексного коэффициента отражения на частоте измерения проводилось с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ). Весь процесс осуществляется в полностью автоматизированном режиме и управляется с рабочего места оператора.

Результаты пересчета экспериментальных данных в зависимость КУ от частоты показаны на рис. 20. Колебательный характер частотной характеристики объясняется периодическим изменением реактивной составляющей наведенного сопротивления на входе антенны в зависимости от частоты. КУ антенны легко определяется путем статистического усреднения результатов.

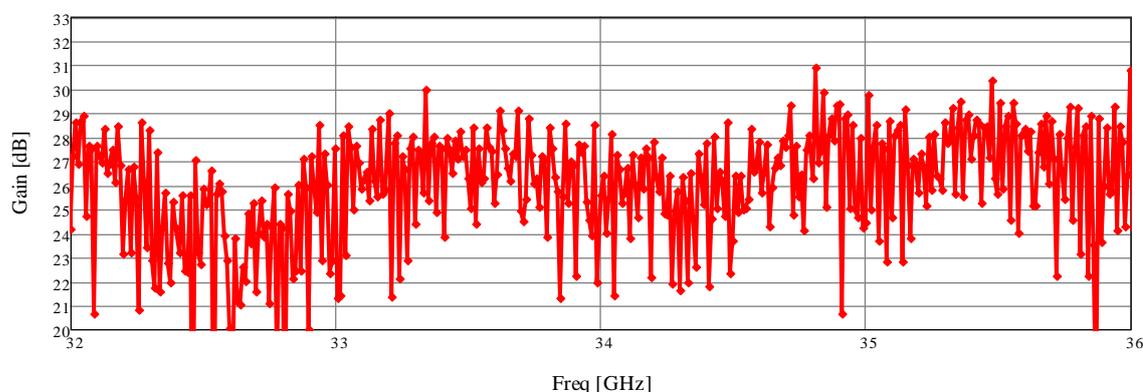


Рисунок 20. Распределение усреднённого КУ в зависимости от частоты

Экспериментальные исследования абсолютного метода измерения КУ антенны с помощью рефлектора показали совпадение с результатами измерений в дальней зоне относительными методами с точностью 0,5 дБ [6]. В процессе работы был освоен очередной метод измерения параметров антенн, а также проведён ряд экспериментов.

- Проведен расчет, моделирование и изготовление ВЦАР миллиметрового и сантиметрового диапазонов по заданным требованиям к антенной системе [7].

- Экспериментальные исследования ВЦАР в АИВК показали совпадение результатов электродинамического моделирования с результатами испытаний с точностью используемого средства измерений.

- Благодаря созданию стабильных электромагнитных, механических и климатических условий в АИВК, измерения и испытания радиоаппаратуры проводятся с высокой точностью и могут быть автоматизированы, что повышает качество измерений.

4. Источники финансирования и выражение признательности

Исследования проведены в ходе реализации комплексного проекта «Разработка и организация высокотехнологичного производства малогабаритной многорежимной бортовой радиолокационной системы Ku-диапазона волн для оснащения перспективных беспилотных и вертолетных систем» при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России), а также в рамках выполнения в НПЦ РИМ государственного заказа «Обеспечение проведения научных исследований» по теме № П4333-04000.

Библиографический список

1. 1. Добычина Е.М. Антенный измерительно-вычислительный комплекс на базе безэховой камеры // Материалы 22-ой Международной Крымской

конференции «СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012), Севастополь, 2012, С. 477-478.

2. Добычина Е.М., Войтович М.И., Обухов А.Е. Измерение характеристик экранированной безэховой камеры // Материалы 23-ой Международной Крымской конференции (КрыМиКо'2013), Севастополь, 2013, С. 634-635.

3. Гиголо А.И., Кузнецов Г.Ю. Решение задачи рассеяния на протяженных цилиндрических телах различного сечения // Труды МАИ, 2013, №68: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41978>

4. Добычина Е.М., Снастин М.В., Бибко М.С. Бортовая волноводно-щелевая антенная решетка // Материалы 24-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014), Севастополь, 2014. С. 459 - 460.

5. Gregson S., McCormick J., Parini C. Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements // The Institution of Engineering and Technology. London. 2007. 413 p.

6. Снастин М.В., Добычина Е.М. Абсолютный метод измерения коэффициента усиления антенн // Тезисы докладов 14-ой Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015». Москва, 2015. С. 274-276.

7. Кондратьева С.Г. Многофункциональная бортовая антенная решетка интегрированного радиоэлектронного комплекса // Труды МАИ, 2012, №52: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29560>