

УТВЕРЖДАЮ

**Первый заместитель генерального директора -
заместитель по научной работе**

ФГУП «ВНИИФТРИ»

А.Н. Шипунов
«  »  2019 г.

Инструкция

**Комплекс антенный измерительный ближней зоны
«Апертура 9,0×6,0»**

Методика поверки

133-19-01 МП

2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВОДНАЯ ЧАСТЬ.....	3
2 ОПЕРАЦИИ ПОВЕРКИ	3
3 СРЕДСТВА ПОВЕРКИ	4
4 ТРЕБОВАНИЯ К КВАЛИФИКАЦИИ ПОВЕРИТЕЛЕЙ	4
5 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ.....	4
6 УСЛОВИЯ ПОВЕРКИ.....	5
7 ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ПОВЕРКИ	5
8 ПРОВЕДЕНИЕ ПОВЕРКИ.....	5
8.1 Внешний осмотр.....	5
8.2 Опробование	5
8.3 Определение метрологических характеристик	7
8.3.1 Определение погрешности измерений амплитудного распределения электромагнитного поля и абсолютной погрешности измерений фазового распределения электромагнитного поля .	7
8.3.2 Определение погрешности измерений относительных уровней амплитудной диаграммы направленности и абсолютной погрешности измерений фазовой диаграммы направленности..	13
8.3.3 Определение погрешности измерений коэффициента усиления антенны методом замещения	15
8.3.4 Определение относительной погрешности измерений ширины главного лепестка амплитудных диаграмм направленности.....	16
8.3.5 Определение относительной погрешности измерений углового положения минимума разностных амплитудных диаграмм направленности	16
8.3.6 Определение диапазона рабочих частот	17
8.3.7 Определение размеров рабочей области сканирования	17
8.3.8 Определение погрешности установки пространственного положения зонда.....	18
8.3.9 Определение сектора углов восстанавливаемых диаграмм направленности	18
9 ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ	18

1 ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

1.1 Настоящая методика поверки (далее – МП) устанавливает методы и средства первичной и периодической поверок комплекса антенного измерительного ближней зоны «Апертура 9,0×6,0», изготовленного ПАО «Радиофизика», г. Москва, заводской № 001 (далее – комплекс).

1.2 Первичная поверка комплекса проводится при вводе его в эксплуатацию и после ремонта.

1.3 Периодическая поверка комплекса проводится в ходе его эксплуатации и хранения.

1.4 Комплекс предназначен для измерений радиотехнических характеристик антенн.

1.5 Периодическая поверка комплекса проводится не реже одного раза в 24 (двадцать четыре) месяца.

1.6 Не допускается проведение поверки отдельных измерительных каналов или отдельных автономных блоков или меньшего числа измеряемых величин или на меньшем числе поддиапазонов измерений.

2 ОПЕРАЦИИ ПОВЕРКИ

При проведении поверки комплекса должны быть выполнены операции, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Операции поверки

Наименование операции	Пункт МП	Проведение операций при	
		первичной поверке	периодической поверке
1 Внешний осмотр	8.1	+	+
2 Опробование	8.2	+	+
3 Определение метрологических характеристик	8.3	+	+
3.1 Определение погрешности измерений амплитудного распределения электромагнитного поля и абсолютной погрешности измерений фазового распределения электромагнитного поля	8.3.1	+	+
3.2 Определение погрешности измерений относительных уровней амплитудной диаграммы направленности и абсолютной погрешности измерений фазовой диаграммы направленности	8.3.2	+	-
3.3 Определение погрешности измерений коэффициента усиления антенны методом замещения	8.3.3	+	-
3.4 Определение относительной погрешности измерений ширины главного лепестка амплитудной диаграммы направленности	8.3.4	+	-
3.5 Определение относительной погрешности измерений	8.3.5	+	-

углового положения луча (минимума разностной) амплитудной диаграммы направленности			
3.6 Определение диапазона рабочих частот	8.3.6	+	-
3.7 Определение размеров рабочей области сканирования	8.3.7	+	-
3.8 Определение погрешности установки пространственного положения зонда	8.3.8	+	-
3.9 Определение сектора углов измеряемых диаграмм направленности	8.3.9	+	-

3 СРЕДСТВА ПОВЕРКИ

3.1 При проведении поверки комплекса должны быть применены средства измерений, указанные в таблице 2.

Таблица 2 – Средства измерений для поверки комплекса

Пункт МП	Наименование и тип (условное обозначение) основного или вспомогательного средства поверки; обозначение нормативного документа, регламентирующего технические требования, и (или) метрологические и основные технические характеристики средства поверки
8.3.1 - 8.3.6, 8.3.9	Аттенюатор ступенчатый программируемый 84908М, диапазон частот от 0 до 50 ГГц, диапазон вводимых ослаблений от 0 до 65 дБ с шагом 5 дБ
8.3.1 - 8.3.6, 8.3.9	Набор мер коэффициентов передачи и отражения 85056А, диапазон частот от 45 МГц до 50 ГГц
8.3.1 - 8.3.9	Система лазерная координатно-измерительная Leica AT401, диапазон измерений расстояний от 1,5 до 60000 мм, предел допускаемой основной абсолютной погрешности объемных измерений ± 15 мкм + 6 мкм/м

3.2 Допускается использовать аналогичные средства поверки, которые обеспечат измерения соответствующих параметров с требуемой точностью.

3.3 Средства поверки должны быть исправны, поверены и иметь свидетельства о поверке.

4 ТРЕБОВАНИЯ К КВАЛИФИКАЦИИ ПОВЕРИТЕЛЕЙ

4.1 Поверка должна осуществляться лицами с высшим и средним техническим образованием, аттестованными в качестве поверителей в области радиотехнических измерений в соответствии с ГОСТ Р 56069-2014, и имеющими квалификационную группу электробезопасности не ниже третьей.

4.2 Перед проведением поверки поверитель должен предварительно ознакомиться с документом «Комплекс антенный измерительный ближней зоны «Апертура 9,0×6,0». Руководство по эксплуатации. СИКЛ.411713.001 РЭ».

5 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

5.1 При проведении поверки должны быть соблюдены все требования безопасности в соответствии с ГОСТ 12.3.019-80 «ССБТ. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности», а также требования безопасности, приведённые в эксплуатационной документации на составные элементы комплекса и средства поверки.

5.2 Размещение и подключение измерительных приборов разрешается производить только при выключенном питании.

6 УСЛОВИЯ ПОВЕРКИ

6.1 При проведении поверки комплекса должны соблюдаться условия, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 – Условия проведения поверки комплекса

Влияющая величина	Нормальное значение	Допускаемое отклонение от нормального значения
Температура окружающей среды, °С	20	±5
Относительная влажность воздуха, %	от 30 до 80	–
Атмосферное давление, кПа	от 84 до 106,7	–
Напряжение питающей сети переменного тока, В	230	±23
Частота питающей сети, Гц	50	±1

7 ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ПОВЕРКИ

7.1 Проверить наличие эксплуатационной документации и срок действия свидетельств о поверке на средства поверки.

7.2 Подготовить средства поверки к проведению измерений в соответствии с руководствами по их эксплуатации.

8 ПРОВЕДЕНИЕ ПОВЕРКИ

8.1 Внешний осмотр

8.1.1 При проведении внешнего осмотра комплекса проверить:

- комплектность и маркировку комплекса;
- наружную поверхность элементов комплекса, в том числе управляющих и питающих кабелей;
- состояние органов управления;

8.1.2 Проверку комплектности комплекса проводить сличением действительной комплектности с данными, приведенными в разделе «Комплект поставки» документа «Комплекс антенный измерительный ближней зоны «Апертура 9,0×6,0». Паспорт. СИКЛ.411713.001 ПС» (далее – ПС).

8.1.3 Проверку маркировки производить путем внешнего осмотра и сличением с данными, приведенными в ПС.

8.1.4 Результаты внешнего осмотра считать положительными, если:

- комплектность и маркировка комплекса соответствует ПС;
- наружная поверхность комплекса не имеет механических повреждений и других дефектов;
- управляющие и питающие кабели не имеют механических и электрических повреждений;
- органы управления закреплены прочно и без перекосов, действуют плавно и обеспечивают надежную фиксацию;
- все надписи на органах управления и индикации четкие и соответствуют их функциональному назначению.

В противном случае результаты внешнего осмотра считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить.

8.2 Опробование

8.2.1 Идентификация программного обеспечения (далее – ПО)

8.2.1.1 Включить персональные компьютеры (далее – ПК), для чего:

- на блоке источника бесперебойного питания нажать кнопку ВКЛ;

- нажать на системном блоке ПК кнопку включения;
- включить монитор.

После загрузки операционной системы WINDOWS 7 на экране монитора ПК наблюдать иконку программы *FrequencyMeas*, *NFCalc*, *AmrView*.

Установить далее на ПК программу, позволяющую определять версию и контрольную сумму файла по алгоритму MD5, например, программу «HashTab».

8.2.1.2 Выбрать в папке TRIM файл *FrequencyMeas.exe*, нажать на правую кнопку мыши на файле и выбрать пункт «Свойства». Открыть вкладку «Хеш-суммы файлов». Наблюдать контрольную сумму файла *FrequencyMeas.exe* по алгоритму MD5. Открыть вкладку «О программе». Наблюдать значение версии файла *FrequencyMeas.exe*. Результаты наблюдения зафиксировать в рабочем журнале.

8.2.1.3 Повторить операции п. 8.2.1.2 для программы *NFCalc.exe* и *AmrView.exe*.

8.2.1.4 Сравнить полученные контрольные суммы и версии с их значениями, записанными в ПС. Результат сравнения зафиксировать в рабочем журнале.

8.2.1.5 Результаты идентификации ПО считать положительными, если полученные идентификационные данные ПО соответствуют значениям, приведенным в таблице 3.

Таблица 3 - Идентификационные данные ПО

Идентификационные данные (признаки)	Значение		
	FrequencyMeas.exe	NFCalc.exe	AmrView.exe
Идентификационное наименование ПО	FrequencyMeas.exe	NFCalc.exe	AmrView.exe
Номер версии (идентификационный номер) ПО	4.6.0.0	3.20.1	3.18.261114
Цифровой идентификатор ПО (контрольная сумма исполняемого кода)	6D0A938315B1DBA C4F3B15C308FFC6B 0 (алгоритм MD5)	90F2307A43D11220 7504337B9CCA9F24 (алгоритм MD5)	FAF113F3C83206EB 863D69624F5D3FC0 (алгоритм MD5)

В противном случае результаты проверки соответствия ПО считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить.

8.2.2 Проверка работоспособности

8.2.2.1 Подготовить комплекс к работе в соответствии с РЭ.

8.2.2.2 Проверить работоспособность аппаратуры комплекса путем проверки отсутствия сообщений об ошибках и неисправностях при загрузке программного продукта для измерений в ближней зоне «*FrequencyMeas.exe*».

8.2.2.3 Проверить работоспособность всех приводов сканера:

- при перемещении по оси 0x;
- при перемещении по оси 0y;
- при перемещении по оси 0z;
- при вращении каретки зонда в плоскости поляризации.

8.2.2.4 Соединить при помощи перемычки соединитель кабеля «вход антенны-зонда» и соединитель кабеля «выход испытываемой антенны». В соответствии с эксплуатационной документацией подготовить к работе векторный анализатор электрических цепей (далее – анализатор) из состава комплекса, перевести его в режим измерений модуля комплексного коэффициента передачи. Установить следующие настройки анализатора:

- полоса анализа от 1 до 50 ГГц;
- ширина полосы пропускания 1 МГц;
- уровень мощности выходного колебания 0 дБ (мВт).

На экране анализатора наблюдать результат измерений частотной зависимости модуля коэффициента передачи. При этом должны отсутствовать резкие изменения полученной характеристики, свидетельствующие о неудовлетворительном состоянии радиочастотного тракта комплекса.

8.2.2.5 Результаты поверки считать положительными, если сканер обеспечивает перемещение антенны-зонда по осям 0x, 0y, 0z и в плоскости поляризации, на экране анализатора

наблюдается результат измерений частотной зависимости модуля коэффициента передачи без резких изменений, а также отсутствует программная или аппаратная сигнализация о неисправностях комплекса.

В противном случае результаты поверки считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить, комплекс бракуется и подлежит ремонту.

8.3 Определение метрологических характеристик

8.3.1 Определение погрешности измерений амплитудного распределения электромагнитного поля и абсолютной погрешности измерений фазового распределения электромагнитного поля

8.3.1.1 Погрешность измерений амплитудного распределения электромагнитного поля δ_A , дБ, определить по формулам (1) – (4):

$$\delta_A = 20 \lg(1 + KS_\Sigma), \quad (1)$$

$$S_\Sigma = \sqrt{\left(\frac{\theta_{A1}^2 + \theta_{A2}^2}{3}\right) + S^2}, \quad (2)$$

$$K = \frac{tS + 1.1\sqrt{\theta_{A1}^2 + \theta_{A2}^2}}{S + \sqrt{\frac{\theta_{A1}^2 + \theta_{A2}^2}{3}}}, \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \left(\frac{A_j - \bar{A}}{A_j}\right)^2}{m-1}}, \quad (4)$$

где θ_{A1} - погрешность измерений модуля комплексного коэффициента передачи анализатором из состава комплекса;

θ_{A2} - погрешность измерений, обусловленная неидеальной поляризационной развязкой антенн-зондов из состава комплекса;

S – среднее квадратическое отклонение результатов измерений амплитудного распределения;

A – результат измерений амплитудного распределения;

\bar{A} – среднее арифметическое результатов измерений амплитудного распределения;

t – коэффициент Стьюдента для заданного числа реализаций измерений амплитудного распределения.

Абсолютную погрешность измерений фазового распределения электромагнитного поля Δ_ϕ , градус, определить по формулам (5) – (8):

$$\Delta_\phi = \frac{180}{\pi} K_\phi S_{\Sigma\phi}, \quad (5)$$

$$S_{\Sigma\phi} = \sqrt{\left(\frac{\theta_{\phi1}^2 + \theta_{\phi2}^2 + \theta_{\phi3}^2}{3}\right) + S_\phi^2}, \quad (6)$$

$$K_\phi = \frac{tS_\phi + 1.1\sqrt{\theta_{\phi1}^2 + \theta_{\phi2}^2 + \theta_{\phi3}^2}}{S_\phi + \sqrt{\frac{\theta_{\phi1}^2 + \theta_{\phi2}^2 + \theta_{\phi3}^2}{3}}}, \quad (7)$$

$$S_{\varphi} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\varphi_j - \bar{\varphi})^2}{m-1}}, \quad (8)$$

где $\theta_{\varphi 1}$ - погрешность измерений фазы комплексного коэффициента передачи векторным анализатором цепей из состава комплекса, рад;

$\theta_{\varphi 2}$ - погрешность измерений фазы, обусловленная неточностью позиционирования антенны-зонда в плоскости сканирования, рад;

$\theta_{\varphi 3}$ - погрешность измерений фазы, обусловленная случайными перегибами радиочастотного тракта комплекса, рад;

S_{φ} - среднее квадратическое отклонение результатов измерений фазового распределения, рад;

φ - результат измерений фазового распределения, рад;

$\bar{\varphi}$ - среднее арифметическое значение результатов измерений фазового распределения, рад.

Погрешности измерений амплитудного распределения электромагнитного поля и абсолютные погрешности измерений фазового распределения электромагнитного поля определить при относительных уровнях амплитудного распределения -5 дБ и от -10 до -50 дБ с интервалом 10 дБ. Динамический диапазон измерений амплитудного распределения при этом должен составлять не менее 60 дБ. Под динамическим диапазоном измерений амплитудного распределения понимать отношение максимального уровня амплитудного распределения к среднему уровню измеряемых радишумов.

Погрешности измерений амплитудного распределения электромагнитного поля и относительные погрешности измерений фазового распределения электромагнитного поля определить на частотах 1; 25; 50 ГГц.

На частотах от 1 до 25 ГГц ограничиться формулами (9) и (10):

$$\Delta_A = 20 \lg(1 + 1.1 \sqrt{\theta_{A1}^2 + \theta_{A2}^2}); \quad (9)$$

$$\Delta_{\varphi} = \frac{180}{\pi} 1.1 \sqrt{\theta_{\varphi 1}^2 + \theta_{\varphi 2}^2 + \theta_{\varphi 3}^2}. \quad (10)$$

Частные составляющие погрешности измерений (слагаемые в выражениях (2), (3), (6), (7)) определить по следующим методикам.

8.3.1.2 Погрешность измерений модуля комплексного коэффициента передачи векторным анализатором цепей из состава комплекса определить при помощи аттенюатора Agilent 84908M.

В измерительный тракт комплекса внести аттенюатор таким образом, чтобы он соединял разъемы радиочастотных кабелей для подключения испытываемой антенны и антенны-зонда. Ослабление аттенюатора установить равным 0 дБ.

Провести полную двухпортовую калибровку анализатора из состава комплекса в комплекте с штатными радиочастотными кабелями, СВЧ-опто и Опто-СВЧ преобразователями и аттенюатором в диапазоне частот от 1 до 26 ГГц в соответствии с технической документацией на него.

Установить следующие настройки анализатора:

- полоса анализа от 1 до 26 ГГц;
- ширина полосы пропускания 500 Гц;
- режим измерений модуля комплексного коэффициента передачи S21;
- количество точек 3601.

Без подачи мощности с порта генератора векторного анализатора цепей провести измерения модуля комплексного коэффициента передачи $|S_{12}(f_i)|$, дБ. Зафиксировать верхнюю границу АЧХ шума N, дБ.

Увеличивая мощность сигнала с порта генератора анализатора, зафиксировать опорный уровень, при котором обеспечивается условие $|S12(f_i)| \geq (N + 60)$, дБ.

Изменяя ослабление аттенюатора от 0 до 50 дБ с шагом 5 дБ, провести измерения модуля комплексного коэффициента передачи.

Погрешность измерений модуля комплексного коэффициента передачи на каждой частоте f_i , указанной в п. 8.3.1.1, рассчитать как разность (в логарифмических единицах) между измеренным значением модуля коэффициента передачи $|S12(f_i)|$, дБ, и действительным значением ослабления аттенюатора $L(f_i)$, дБ, записанным в его технической документации (свидетельстве о поверке), по формуле (11):

$$\theta_{A1}(f_i) = |S12(f_i)| - L(f_i), \quad (11)$$

За погрешность θ_{A1} для каждого номинала ослабления, соответствующего относительному уровню амплитудного распределения электромагнитного поля М, принять максимальное значение погрешности измерений $\theta_{A1}(f_i)$ соответствующего номинала ослабления аттенюатора в установленной полосе частот в линейном масштабе (12):

$$\theta_{A1}^{(M)} = \max \left\{ 10^{\frac{\theta_{A1}^{(M)}(f_i)}{20}} \right\}. \quad (12)$$

Аналогичные измерения и расчеты выполнить в диапазоне частот от 26 до 50 ГГц.

Результаты поверки записать в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты оценки погрешности измерений модуля комплексного коэффициента передачи анализатором из состава комплекса

Ослабление аттенюатора L, дБ	Относительный уровень амплитудного распределения М, дБ	Погрешность измерений θ_{A1} , дБ
10	-10	
20	-20	
30	-30	
40	-40	
50	-50	

8.3.1.3 Погрешность измерений, обусловленную неидеальной поляризационной развязкой антенн-зондов из состава комплекса, определить по формуле (13):

$$\theta_{A2} = (1 + 10^{0.1KPP})^2 - 1, \quad (13)$$

где KPP - минимальный уровень кроссполяризационной развязки антенн-зондов из состава комплекса, принимаемый равным -20 дБ.

8.3.1.4 Погрешность измерений фазы комплексного коэффициента передачи векторным анализатором цепей из состава комплекса определить с помощью набора мер коэффициентов передачи и отражения 85056А и аттенюатора Agilent 84908М.

В измерительный тракт комплекса внести аттенюатор и меру фазового сдвига из состава набора 85056А таким образом, чтобы они соединяли разъемы радиочастотных кабелей для подключения испытываемой антенны и антенны-зонда. Ослабление аттенюатора установить равным 0 дБ.

Провести полную двухпортовую калибровку анализатора из состава комплекса в комплекте с штатными радиочастотными кабелями, аттенюатором, в соответствии с технической документацией на него.

Изменяя ослабление аттенюатора от 0 до 50 дБ с шагом 5 дБ, провести измерения фазы комплексного коэффициента передачи при следующих настройках анализатора:

- полоса анализа от 1 до 26 ГГц;

- ширина полосы пропускания 500 Гц;
- уровень мощности выходного колебания 0 дБ (мВт);
- режим измерений фазы комплексного коэффициента передачи S21;
- количество точек 3601.

Погрешность измерений фазы комплексного коэффициента передачи на каждой частоте f_i , указанной в п. 8.3.1.1, рассчитать как разность между измеренным значением фазы коэффициента передачи $\arg(S_{12}(f_i))$, рад, и действительным значением установленного фазового сдвига меры $\Phi^{(N)}(f_i)$, рад, записанным в его технической документации (14):

$$\theta_{\phi 1}^{(N)}(f_i) = \arg(S_{12}(f_i)) - \Phi^{(N)}(f_i), \quad (14)$$

За погрешность $\theta_{\phi 1}$ для каждого номинала относительного уровня фазового распределения электромагнитного поля принять максимальное значение погрешности измерений $\theta_{\phi 1}^{(N)}(f_i)$ соответствующего номинала ослабления аттенюатора в установленной полосе частот (15):

$$\theta_{\phi 1}^{(N)} = \max\{\theta_{\phi 1}^{(N)}(f_i)\}. \quad (15)$$

Провести аналогичные измерения и расчеты для полосы частот от 26 до 50 ГГц. Результаты поверки записать в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты оценки погрешности измерений фазы комплексного коэффициента передачи анализатором из состава комплекса

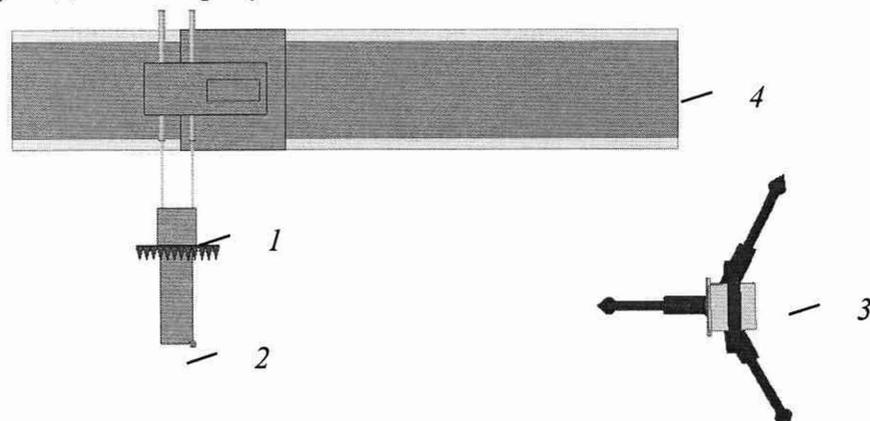
Ослабление аттенюатора L, дБ	Относительный уровень амплитудного распределения M, дБ	Погрешность измерений $\theta_{\phi 1}$, градус
10	-10	
20	-20	
30	-30	
40	-40	
50	-50	

8.3.1.5 Погрешность измерений фазы, обусловленную неточностью позиционирования антенны-зонда в плоскости сканирования, определить с помощью системы лазерной координатно-измерительной Leica AT401.

Подготовить комплекс к измерению характеристик антенн в ближней зоне в соответствии с РЭ.

Подготовить систему лазерную координатно-измерительную Leica AT401 к измерению в соответствии с эксплуатационной документацией на нее.

Оптический отражатель из состава системы лазерной координатно-измерительной Leica AT401 закрепить на антенну-зонд, установленную на сканере из состава комплекса, в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.



1 – антенна-зонд; 2 – оптический отражатель; 3 – система Leica AT401; 4 – сканер

Рисунок 1 – Схема измерений характеристик позиционирования сканера

С помощью программы ручного управления сканером (рисунок 2) в соответствующей вкладке программного продукта для измерений в ближней зоне «FrequencyMeas» переместить антенну-зонд в крайнее центральное левое положение. Зафиксировать показания Leica AT401.

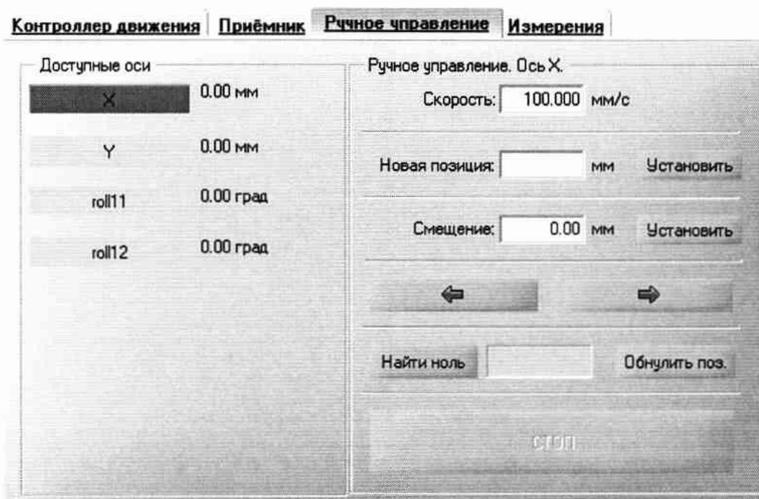


Рисунок 2 – Меню программы для ручного управления движением сканера

Перемещая антенну-зонд с установленным оптическим отражателем вдоль оси 0x в пределах рабочей зоны сканера с шагом $\lambda_{min}/2$, где λ_{min} - минимальная длина волны, соответствующая верхней границе диапазона рабочих частот комплекса, до срабатывания механического ограничителя, фиксировать показания системы лазерной координатно-измерительной Leica AT401.

С помощью программы ручного управления сканером (рисунок 2) в соответствующей вкладке программного продукта для измерений в ближней зоне «FrequencyMeas» переместить антенну-зонд в крайнее центральное нижнее положение. Зафиксировать показания Leica AT401.

Перемещая антенну-зонд с установленным оптическим отражателем вдоль оси 0y в пределах рабочей зоны сканера с шагом $\lambda_{min}/2$, до срабатывания механического ограничителя, фиксировать показания системы лазерной координатно-измерительной Leica AT401.

Рассчитать погрешность позиционирования антенны-зонда как разность между координатами вертикальной плоскости измерений системы лазерной координатно-измерительной Leica AT401 и измеренными координатами положения антенны-зонда Δz , м.

Погрешность измерений фазы $\Delta\varphi(f_i)$, рад, обусловленную неточностью позиционирования антенны-зонда в плоскости сканирования, для каждого номинала частоты, указанного в п. 8.3.1.1, оценить по формуле (16):

$$\Delta\varphi(f_i) = k \cdot \Delta z, \quad (16)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число, 1/м;

λ - длина волны, соответствующая частотам, указанным в п. 5.1.1, м.

За погрешность измерений фазы $\theta_{\varphi 2}$ для каждого номинала частоты, указанного в п. 8.3.1.1, принять среднее квадратическое значение погрешности, определенное по формуле (17):

$$\theta_{\varphi 2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{M-1} (\Delta\varphi(f_i))^2}{M}}, \quad (17)$$

где M – число точек, в которых проводились измерения пространственного положения антенны-зонда.

Размеры рабочей области сканирования по осям 0x и 0y рассчитать как разность между показаниями системы лазерной координатно-измерительной Leica AT401 в момент срабатыва-

ния механического ограничителя сканера и ее показаниями при установке антенны-зонда в крайние положения.

8.3.1.6 Погрешность измерений фазы, обусловленную случайными перегибами радиочастотного тракта комплекса определить с помощью набора меры отражения из состава мер коэффициентов передачи и отражения 85056А.

В измерительный тракт комплекса внести меру отражения таким образом, чтобы он замыкал соединитель радиочастотного кабеля для подключения антенны-зонда.

Провести однопортовую калибровку анализатора из состава комплекса в диапазоне частот от 26 до 50 ГГц в соответствии с технической документацией на него.

Провести измерения фазы комплексного коэффициента отражения при следующих настройках анализатора:

- полоса анализа от 26 до 50 ГГц;
- ширина полосы пропускания 500 Гц;
- уровень мощности выходного колебания -10 дБ (мВт);
- режим измерений фазы комплексного коэффициента отражения SI1.

С помощью программы ручного управления сканером (рисунок 2) в соответствующей вкладке программного продукта для измерений в ближней зоне «NFMeas» переместить антенну-зонд в крайнее нижнее положение.

Перемещая антенну-зонд с установленным оптическим отражателем вдоль оси xOy в пределах рабочей зоны сканера с шагом 20 см, фиксировать показания анализатора.

За оценку погрешности измерений фазы, обусловленную случайными перегибами радиочастотного тракта комплекса, принять разность между максимальным и минимальным значением измеренной фазы комплексного коэффициента отражения на частоте 50 ГГц.

8.3.1.7 Оценку среднего квадратического отклонения результатов измерений амплитудного и фазового распределений (АФР) проводить методом прямых измерений с многократными наблюдениями распределения поля, формируемого на плоскости сканирования антенной из состава комплекта вспомогательных антенн (рупорная антенна МІ с установочным фланцем и коаксиально волноводным адаптером с диапазоном частот до 50 ГГц).

Антенну из комплекта вспомогательных антенн установить на опорно-поворотное устройство в положение, соответствующее вертикальной поляризации, таким образом, чтобы плоскость раскрытия была параллельна плоскости сканирования.

Используя режим ручного или дистанционного управления сканера, установить антенну-зонд соосно с антенной из комплекта вспомогательных антенн в положение, соответствующее вертикальной поляризации.

Расстояние между раскрытиями антенны из комплекта вспомогательных антенн и антенны-зонда установить равным в пределах 3λ , где λ – максимальная длина волны измеряемого поддиапазона частот.

Запустить программу измерений в частотной области.

В соответствии с РЭ на комплекс установить полосу частот анализатора от 26 до 50 ГГц, ширину полосы пропускания 100 Гц, шаг перестройки по частоте 5 ГГц, уровень мощности выходного сигнала анализатора 0 дБ (мВт).

Далее установить следующие настройки:

- шаг сканирования - не более $\lambda/2$;
- режим сканирования – непрерывное сканирование без реверса;
- поляризация измеряемой антенны – вертикальная;
- поляризация зонда – вертикальная;
- размеры области сканирования 200×300 мм.

Нажать кнопку «НАЧАТЬ ИЗМЕРЕНИЯ».

Измерить АФР не менее 7 раз с интервалом не менее 5 мин (далее по тексту - результаты измерений АФР, полученные в ходе одного сканирования, – реализация).

Запустить программу расчета характеристик антенн по данным в ближнем поле, входящую в комплект поставки комплекса. На частоте 50 ГГц рассчитать амплитудные A_j и фазовые φ_j распределения, а также среднее квадратическое отклонение результатов измерений ампли-

тудного и фазового распределений по формулам (4) и (8).

8.3.1.8 Результаты поверки считать положительными, если значения погрешности измерений амплитудного распределения электромагнитного поля при динамическом диапазоне измерений амплитудного распределения не менее 60 дБ и кроссполяризационной развязке антенны-зонда не менее 20 дБ находятся в следующих пределах для относительных уровней амплитудного распределения:

-10 дБ	±0,3 дБ;
-20 дБ	±0,4 дБ;
-30 дБ	±0,5 дБ;
-40 дБ	±1,1 дБ;
-50 дБ	±1,4 дБ,

а значения абсолютной погрешности измерений фазового распределения электромагнитного поля при динамическом диапазоне измерений амплитудного распределения не менее 60 дБ находятся в следующих пределах при относительном уровне амплитудного распределения:

-10 дБ	±5°;
-20 дБ	±7°;
-30 дБ	±8°;
-40 дБ	±9°;
-50 дБ	±14°.

В противном случае результаты поверки считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить, комплекс бракуется и подлежит ремонту.

8.3.2 Определение погрешности измерений относительных уровней амплитудной диаграммы направленности и абсолютной погрешности измерений фазовой диаграммы направленности

8.3.2.1 Определение погрешности измерений относительных уровней амплитудных диаграмм направленности (АДН) и фазовых диаграмм направленности (ФДН) осуществить методом математического моделирования с учетом результатов, полученных в п. 8.3.1 настоящего документа, путем сравнения невозмущенных амплитудных диаграмм направленности, определенных для антенны с равномерным синфазным распределением токов на апертуре, и тех же диаграмм направленности, но с учетом погрешности измерений амплитудного и фазового распределений (АФР).

8.3.2.2 Невозмущенную диаграмму направленности оценить следующим образом.

Размеры плоскости сканирования выбрать из критерия максимального сектора углов восстанавливаемой ДН, равного $\pm 65^\circ$, по формулам (18):

$$\begin{aligned} L_x &= a + 2R \cdot \operatorname{tg} \theta, \\ L_y &= b + 2R \cdot \operatorname{tg} \varphi, \end{aligned} \quad (18)$$

где L_x, L_y – размеры плоскости сканирования в соответствующих плоскостях, м;

a, b – размеры раскрыва в соответствующих плоскостях, м, $a = b \geq 5\lambda_{\max}$, где λ_{\max} – длина волны, соответствующая частотам 1; 25 и 50 ГГц;

R – измерительное расстояние, $R = 3 \lambda_{\max}$, м;

$\Theta = 2,27$ рад..

Интервал дискретизации выбрать равным $0,5\lambda_{\max}$.

Для частоты 1 ГГц пересчитать АФР в раскрыве антенны в АФР на плоскости сканирования по формуле (19):

$$J(x_2, y_2) = \left[\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \left[\frac{A_0(x, y) \exp[j(\varphi_0(x, y))]}{\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + R^2}} \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + R^2}\right] \right] \right], \quad (19)$$

где $J(x_2, y_2)$ – АФР на плоскости сканирования;

(x_2, y_2) – координаты на плоскости сканирования, м;

A_0 – амплитуда сигнала ($A_0 = 1 B$);

φ_0 – фаза сигнала ($\varphi_0 = 0 \text{ рад}$);

$N(M) = \left[\frac{L_x(L_y)}{\Delta x(\Delta y)} \right]$ – число шагов сканирования в каждой из плоскостей, где $\Delta x, \Delta y$ – шаг сканирования в плоскости X и Y, соответственно.

Рассчитать нормированную амплитудную диаграмму направленности и фазовую диаграмму направленности по формулам (20) и (21):

$$F_A(u, v) = \sqrt{1 - u^2 - v^2} \frac{|\Im(J(x_2, y_2))|}{\text{MAX}(|\Im(J(x_2, y_2))|)}, \quad (20)$$

$$F_\varphi(u, v) = \arg[\Im(J(x_2, y_2))] \quad (21)$$

где $|\dots|$ – модуль комплексной величины;

$\Im(\dots)$ – оператор двумерного дискретного преобразования Фурье;

MAX – максимальное значение амплитудной диаграммы направленности;

arg – аргумент функции;

$u = \sin \theta \cdot \cos \varphi$, $v = \sin \theta \cdot \sin \varphi$ – угловые координаты;

$U = \pm \frac{\lambda}{2L_x} N$, $V = \pm \frac{\lambda}{2L_y} M$ – угловые сектора в системе координат направляющих косинусов

(u, v) , в пределах которых восстанавливается диаграмма, рад;

$$w = \sqrt{1 - u^2 - v^2}, \quad \theta = \arccos w, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{v}{u}\right).$$

8.3.2.3 Амплитудную диаграмму антенны и ФДН с учетом погрешности измерений АФР оценить следующим образом.

Значения погрешности измерений амплитудного и фазового распределений для каждого относительного уровня амплитудного распределения M задавать программно с учетом оценки погрешности измерений АФР, полученных в п. 8.3.1, по формулам (22) и (23):

$$\delta A = \text{Norm}(0, \sigma^2_A), \quad (22)$$

$$\Delta \varphi = \text{Norm}(0, \sigma^2_\varphi), \quad (23)$$

где Norm – генератор случайных величин, распределенных по нормальному закону;

σ_A – среднее квадратическое отклонение результатов измерений амплитудного распределения

$$\sigma_A = 10^{\frac{\Delta_A}{20}} / 2,45;$$

σ_φ – среднее квадратическое отклонение результатов измерений фазового распределения

$$\sigma_A = \Delta_\varphi / 2,45.$$

Рассчитать амплитудное и фазовое распределения ЭМП на плоскости сканирования с учетом погрешности их измерений по формуле (24):

$$J^*(x_2, y_2) = |J(x_2, y_2)| (1 + \delta A) \exp(j(\arg(J(x_2, y_2)) + \Delta \varphi)). \quad (24)$$

Аналогичным образом провести расчет «возмущенных» ДН 7 раз. При каждой последующей реализации воспроизводить новые случайные величины по законам (21).

8.3.2.4 Погрешность измерений относительных уровней АДН и ФДН оценить следующим образом.

Среднее квадратическое отклонение результатов измерений уровней АДН и ФДН в двух главных сечениях при $\varphi=0$ и $\varphi=\pi/2$ рассчитать по формулам (25) и (26):

$$\sigma F_A = \sum_{i=1}^k \sqrt{\frac{\left(\frac{(F_A^*)_i - F_A}{(F_A^*)_i} \right)^2}{k-1}}, \quad (25)$$

$$\sigma F_{\Phi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k ((F_{\Phi}^*)_i - F_{\Phi})^2}{k-1}} \quad (26)$$

где k – число реализаций моделирования, $k=7$.

Рассчитать погрешность измерений уровней АДН и ФДН по формулам (27) и (28):

$$\delta F_A = \pm 20 \lg(1 + 2,45 \sigma F_A); \quad (27)$$

$$\Delta F_{\Phi} = \pm \frac{180}{\pi} 2,45 \cdot \sigma F_{\Phi}. \quad (28)$$

8.3.2.5 Повторить расчеты для номиналов частот 25 и 50 ГГц.

8.3.2.6 Результаты поверки считать положительными, если значения погрешности измерений относительных уровней амплитудных диаграмм направленности до уровней (при кроссполяризационной развязке антенны-зонда не менее 20 дБ, динамическом диапазоне измеренного амплитудного распределения антенны не менее 60 дБ), не превышают пределов:

-5 дБ	±0,2 дБ;
-10 дБ	±0,3 дБ;
-20 дБ	±0,4 дБ;
-30 дБ	±1,0 дБ;
-40 дБ	±1,8 дБ;
-50 дБ	±2,4 дБ;

и значения абсолютной погрешности измерений фазовых диаграмм направленности (при кроссполяризационной развязке антенны-зонда не менее 20 дБ, динамическом диапазоне измеренного амплитудного распределения антенны не менее 60 дБ) при относительных уровнях амплитудных диаграмм, не превышают пределов:

-10 дБ	±5°;
-20 дБ	±8°;
-30 дБ	±12°;
-40 дБ	±16°;
-50 дБ	±25°.

В противном случае результаты поверки считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить, комплекс бракуется и подлежит ремонту.

8.3.3 Определение погрешности измерений коэффициента усиления антенны методом замещения

8.3.3.1 Погрешность измерений коэффициента усиления определить расчетным путем при использовании результатов измерений, полученных в п. 8.3.2 настоящей МП.

Погрешность измерений коэффициента усиления δ , дБ, рассчитать по формуле (29):

$$\delta = \pm 10 \lg \left(1 + 1,1 \cdot \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} \right), \quad (29)$$

где δ_1 – погрешность измерений АДН до уровней минус 10 дБ, $\delta_1=0,072$;

δ_2 – погрешность коэффициента усиления эталонной антенны, $\delta_2=0,12; 0,2; 0,41; 0,6$;

δ_3 – погрешность за счет рассогласования.

За погрешность δ_3 принять максимальное из двух значений, рассчитанных по формулам (30) и (31):

$$\delta_3' = \frac{(1 - |\Gamma_{\text{Э}}|^2)(1 + |\Gamma_{\text{И}}| \cdot |\Gamma_{\text{К}}|)^2}{(1 - |\Gamma_{\text{Э}}|^2)(1 - |\Gamma_{\text{И}}| \cdot |\Gamma_{\text{Э}}|)^2} - 1, \quad (30)$$

$$\delta_3 = \frac{(1 - |\Gamma_{\text{Э}}|^2)(1 - |\Gamma_{\text{И}}| \cdot |\Gamma_{\text{К}}|)^2}{(1 - |\Gamma_{\text{Э}}|^2)(1 + |\Gamma_{\text{И}}| \cdot |\Gamma_{\text{Э}}|)^2} - 1, \quad (31)$$

где $\Gamma_{\text{Э}}$, $\Gamma_{\text{И}}$, $\Gamma_{\text{К}}$ – коэффициенты отражения входов эталонной, испытываемой антенн, входа анализатора из состава комплекса.

Модуль коэффициента отражения связан с коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) соотношением (32):

$$|\Gamma| = \frac{K - 1}{K + 1}. \quad (32)$$

8.3.3.2 При расчетах погрешности за счет рассогласования значение КСВН эталонной антенны, используемой при проведении измерений, не должно превышать 1,2, испытываемой антенны – 2,0, КСВН входа векторного анализатора цепей – 1,2.

8.3.3.3 Результаты поверки считать положительными, если значения погрешности измерений коэффициента усиления антенны методом замещения при КСВН испытываемой антенны не более 2 и погрешности измерений коэффициента усиления эталонной антенны, дБ:

0,5 дБ	±0,7 дБ;
0,8 дБ	±1,0 дБ;
1,5 дБ	±1,7 дБ;
2,0 дБ	±2,2 дБ.

В противном случае результаты поверки считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить, комплекс бракуется и подлежит ремонту.

8.3.4 Определение относительной погрешности измерений ширины главного лепестка амплитудной диаграммы направленности

8.3.4.1 Определение относительной погрешности измерений ширины главного лепестка амплитудных диаграмм направленности проводить по результатам проверки погрешности измерений по п. 8.3.2.

8.3.4.2 В соответствии с формулами (20) – (24) создать массив нормированных амплитудных диаграмм направленности при максимальных значениях погрешности измерений АФР, полученных в п. 8.3.2. Определить ширину главного лепестка каждой из них в двух главных сечениях на уровне минус 3 дБ относительно максимального значения АДН. Расчеты выполнить на частотах 1; 25; 50 ГГц. Размеры апертуры антенны подобрать таким образом, чтобы ширина АДН варьировалась в пределах до 3°; до 10°; до 40°.

8.3.4.3 Среднее квадратическое отклонение результатов измерений ширины АДН на уровне минус 3 дБ определить по формуле:

$$S(\Omega_A) = \sum_{i=1}^k \sqrt{\frac{((\Omega_A^*)_i - \Omega_A)^2}{k-1}}, \quad (33)$$

где $S(\Omega_A)$ - СКО результатов измерений ширины главного лепестка АДН, град;

$(\Omega_A^*)_i$ - ширина главного лепестка АДН при i -том результате реализации моделирования, град;

Ω_A - ширина главного лепестка невозмущенной АДН, град.

Погрешность измерений ширины главного лепестка АДН рассчитать по формуле (34):

$$\Delta\Omega_A = \pm t \cdot S(\Omega_A). \quad (34)$$

8.3.4.4 Результаты испытаний считать положительными, если значения относительной погрешности измерений ширины главного лепестка амплитудных диаграмм направленности не превышает пределов ±6%.

В противном случае результаты поверки считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить, комплекс бракуется и подлежит ремонту.

8.3.5 Определение относительной погрешности измерений углового положения луча (минимума разностной) амплитудной диаграммы направленности

8.3.5.1 Определение относительной погрешности измерений углового положения луча (минимума разностной) амплитудной диаграммы направленности проводить по результатам проверки погрешности измерений по п. 8.3.2.

8.3.5.2 В соответствии с формулами (20) – (24) создать массив нормированных амплитудных диаграмм направленности при максимальных значениях погрешности измерений АФР, полученных в п. 8.3.2. При этом АФР токов в раскрыве антенны моделировать по закону (т.е. таким образом, чтобы на апертуре укладывались два положительных полупериода косинусного

амплитудного распределения в одной плоскости и один положительный полупериод косинусного амплитудного распределения в другой плоскости при постоянном, но противоположном по знаку фазовом распределении, соответствующим двум полупериодам косинусного амплитудного распределения):

$$J(x, y) = \left| \cos\left(2 \frac{\pi x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi y}{L}\right) \right| \exp(j\phi), \quad (35)$$

где L - расстояние до фазового центра (при моделировании рупорной антенны – его глубина) антенны, м;

ϕ - фаза, $\phi = \pi/2$ при $x \geq L_x/2$ и $\phi = -\pi/2$ при $x < L_x/2$.

8.3.5.3 По результатам моделирования определить глубину нуля разностной АДН и его угловое положение для случая невозмущенной АДН и АДН при максимальных значениях погрешности измерений АФР, полученных в п. 8.3.2 Расчеты выполнить на частотах 1; 50,0 ГГц.

8.3.5.4 Среднее квадратическое отклонение результатов измерений углового положения минимума разностных АДН определить по формуле:

$$S(\Omega_0) = \sum_{i=1}^k \sqrt{\frac{((\Omega_0^*)_i - \Omega_0)^2}{k-1}}, \quad (36)$$

где $S(\Omega_0)$ - СКО результатов измерений углового положения минимума разностных АДН, град;

$(\Omega_0^*)_i$ - угловое положение минимума разностных АДН при i -том результате реализации моделирования, град;

Ω_0 - углового положения минимума невозмущенной разностной АДН, град.

Погрешность измерений углового положения минимума разностных АДН рассчитать по формуле (37):

$$\Delta\Omega_0 = \pm t \cdot S(\Omega_0). \quad (37)$$

8.3.5.5 Линейно изменяя закон фазового распределения в пределах от $-\pi/2$ до $-\pi/4$ и от $\pi/4$ до $\pi/2$, моделировать разностную АДН с отклоненным лучом. По формулам (36) и (37) рассчитать погрешность измерений углового положения минимума разностных АДН.

8.3.5.6 Результаты испытаний считать положительными, если значения относительной погрешности измерений углового положения минимума разностных амплитудных диаграмм направленности не превышают пределов $\pm 3\%$.

В противном случае результаты поверки считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить, комплекс бракуется и подлежит ремонту.

8.3.6 Определение диапазона рабочих частот

8.3.6.1 Проверку диапазона рабочих частот проводить по результатам определения погрешности измерений амплитудного и фазового распределений.

8.3.6.2 Результаты испытаний считать положительными, если в диапазоне частот от 1 до 50 ГГц значения погрешности измерений амплитудного и фазового распределений находятся в пределах установленных значений (см. п. 8.3.1). В этом случае диапазон частот комплекса составляет от 1 до 50 ГГц.

В противном случае результаты поверки считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить, комплекс бракуется и подлежит ремонту.

8.3.7 Определение размеров рабочей области сканирования

8.3.7.1 Определение размеров рабочей области сканирования осуществить по результатам измерений, выполненных в соответствии с п. 8.3.1.5 настоящей МП.

8.3.7.2 Результаты поверки считать положительными, если размеры рабочей области сканирования комплекса (длина \times высота) не менее 9×6 м.

В противном случае результаты поверки считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить, комплекс бракуется и подлежит ремонту.

8.3.8 Определение погрешности установки пространственного положения зонда

8.3.8.1 Определение абсолютной погрешности установки пространственного положения зонда осуществить по результатам измерений, выполненных в соответствии с п. 8.3.1.5 настоящей программы.

8.3.8.2 Результаты испытаний считать положительными, если значения абсолютной погрешности установки пространственного положения зонда находятся в пределах $\pm 0,2$ мм.

8.3.9 Определение сектора углов восстанавливаемых диаграмм направленности

8.3.9.1 Определение сектора углов восстанавливаемых диаграмм направленности осуществить по результатам определения погрешности измерений по п.8.3.2.

8.3.9.2 Результаты поверки считать положительными и сектор углов восстанавливаемой амплитудной диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскостях составляет от -65° до 65° , если при заданных в п. 8.3.2 условиях моделирования (секторы углов Θ и Φ) рассчитанная погрешность измерений относительных уровней АДН не превышает установленных в п. 8.3.2 значений.

В противном случае результаты поверки считать отрицательными и последующие операции поверки не проводить, комплекс бракуется и подлежит ремонту.

9 ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ

9.1 Комплекс признается годным, если в ходе поверки все результаты поверки положительные.

9.2 Результаты поверки удостоверяются свидетельством о поверке в соответствии с Приказом Министерства промышленности и торговли РФ от 02 июля 2015 г. № 1815.

9.3 Если по результатам поверки комплекс признан непригодным к применению, свидетельство о поверке аннулируется и выписывается извещение о непригодности к применению в соответствии с Приказом Министерства промышленности и торговли РФ от 02 июля 2015 г. № 1815.

Начальник НИО-1
ФГУП «ВНИИФТРИ»

О.В. Каминский

Начальник лаборатории № 133
ФГУП «ВНИИФТРИ»

М.С. Шкуркин

Инженер лаборатории № 133
ФГУП «ВНИИФТРИ»

К.И. Курбатов