

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального директора -  
заместитель по научной работе

ФГУП «ВНИИФТРИ»

  
« 18 » 07 2017 г.



## Инструкция

**Комплекс автоматизированный  
измерительно-вычислительный (АИВК) для  
измерения радиотехнических характеристик антенн  
методом ближней зоны в частотной области  
(планарное сканирование)**

**Методика поверки**

**165-17-04 МП**

## 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 .....	6
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 амплитудных диаграмм направленности и абсолютной погрешности измерений фазовых диаграмм направленности....	13
8.3.3 Определение погрешности измерений коэффициента усиления антенн .....	15
8.3.4 Определение диапазона рабочих частот .....	16
8.3.5 Определение размеров рабочей области сканирования .....	16
8.3.6 Определение сектора углов восстанавливаемых диаграмм направленности .....	16
9 ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ .....	16

## 1 ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

1.1 Настоящая методика поверки (далее – МП) устанавливает методы и средства первичной и периодической поверок комплекса автоматизированного измерительно-вычислительного (АИВК) для измерения радиотехнических характеристик антенн методом ближней зоны в частотной области (планарное сканирование), заводской № 1690004 (далее – комплекс), изготовленного ООО «Радиолайн», г. Москва.

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

Периодическая поверка комплекса проводится в ходе его эксплуатации и хранения.

1.2 Поверка комплекса проводится не реже одного раза в 24 (двадцать четыре) месяца и после каждого ремонта.

## 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 амплитудных диаграмм и абсолютной погрешности измерений фазовых диаграмм	8.3.2	+	-
3.3 Определение погрешности измерений коэффициента усиления антенн	8.3.3	+	-
3.4 Определение диапазона рабочих частот	8.3.4	+	-
3.5 Определение размеров рабочей области сканирования	8.3.5	+	-
3.6 Определение сектора углов измеряемых диаграмм направленности	8.3.6	+	-

### 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 – 8.3.4, 8.3.6	Аттенюатор ступенчатый программируемый Agilent 84908M, диапазон частот от 0 до 50 ГГц, диапазон вводимых ослаблений от 0 до 65 дБ с шагом 5 дБ
8.3.1 – 8.3.4, 8.3.6	Набор мер коэффициентов передачи и отражения 85056A, диапазон частот от 45 МГц до 50 ГГц
8.3.1 – 8.3.6,	Система лазерная координатно-измерительная Leica Absolute Tracker AT401, диапазон измерений расстояний от 1,5 до 60000 мм, предел допускаемой основной абсолютной погрешности объемных измерений $\pm 15$ мкм + 6 мкм/м
8.3.1 – 8.3.4, 8.3.6	Антенный измерительный комплект АИК 1-40Б, диапазон рабочих частот от 0,9 до 40 ГГц, пределы допускаемой погрешности измерений коэффициента усиления $\pm 1,2$ дБ (для антенн П6-140-х), $\pm 1,8$ дБ (для антенн П6-123)

3.2 Допускается использовать аналогичные средства поверки, которые обеспечат определение метрологических характеристик с требуемой точностью.

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

### 4 ТРЕБОВАНИЯ К КВАЛИФИКАЦИИ ПОВЕРИТЕЛЕЙ

4.1 Поверка должна осуществляться лицами, имеющими квалификацию поверителей в области радиотехнических измерений и квалификационную группу электробезопасности не ниже третьей.

4.2 Перед проведением поверки поверитель должен предварительно ознакомиться с документом «Комплекс автоматизированный измерительно-вычислительный (АИВК) для измерения радиотехнических характеристик антенн методом ближней зоны в частотной области (планарное сканирование). Руководство по эксплуатации. РЛТГ.425820.010 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 40 до 80	–
Атмосферное давление, кПа	от 84 до 106,7	–
Напряжение питающей сети переменного тока, В	220	±11
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 автоматизированный измерительно-вычислительный (АИВК) для измерения радиотехнических характеристик антенн методом ближней зоны в частотной области (планарное сканирование). Паспорт. РЛТГ.425820.010 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 «*RadioLine Antenna Measurements*».

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

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

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

8.2.1.4 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
Идентификационное наименование ПО	Scanner.exe
Номер версии (идентификационный номер) ПО	1.2.0.3
Цифровой идентификатор ПО (контрольная сумма исполняемого кода)	C232EB8AAB827081782920EB6F335E54 (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 «*RadioLine Antenna Measurements*».

#### 8.2.2.3 Проверить работоспособность всех приводов сканера:

- при перемещении по оси 0x;
- при перемещении по оси 0y;
- при перемещении по оси 0z.

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

- полоса анализа от 0,8 до 40 ГГц;
- ширина полосы пропускания 1 МГц;
- уровень мощности выходного колебания 0 дБ (мВт).

На экране векторного анализатора цепей 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  $0x$ ,  $0y$ ,  $0z$ , на экране векторного анализатора цепей наблюдается результат измерений частотной зависимости модуля коэффициента передачи без резких изменений, а также отсутствует программная или аппаратная сигнализация о неисправностях комплекса.

### 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 При реализации планарного сканирования погрешность измерений амплитудного распределения электромагнитного поля  $\delta_A$ , дБ, определить по формуле (1):

$$\delta_A = \pm 20 \lg(1 + K S_\Sigma), \quad (1)$$

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

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

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

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

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

$S$  - среднее квадратическое отклонение результатов измерений амплитудного распределения;

$A_j$  - результат измерений амплитудного распределения;

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

$t$  - коэффициент Стьюдента для заданного числа реализаций измерений амплитудного распределения.

При реализации планарного сканирования абсолютную погрешность измерений фазового распределения электромагнитного поля  $\Delta_\phi$ , градус, определить по формуле (5):

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

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

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

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

где  $\theta_{\phi_1}$  - погрешность измерений фазы комплексного коэффициента передачи анализатором из состава комплекса, рад;

$\theta_{\phi_2}$  - погрешность измерений фазы, обусловленная неточностью позиционирования антенны-зонда в плоскости сканирования, рад;

$\theta_{\phi_3}$  - погрешность измерений фазы, обусловленная случайными перегибами радиочастотного тракта комплекса, рад;

$S_{\phi}$  - среднее квадратическое отклонение результатов измерений фазового распределения, рад;

$\phi_j$  - результат измерений фазового распределения, рад;

$\bar{\phi}$  - среднее арифметическое 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 от минус 10 до минус 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.

Погрешность измерений амплитудного распределения электромагнитного поля и погрешности измерений фазового распределения электромагнитного поля определить на частотах 0,8; 18,0; 40,0 ГГц.

На частотах 800 МГц и 18 ГГц ограничиться формулами:

$$\delta_A = \pm 20 \lg(1 + |\theta_{A1}| + |\theta_{A2}|); \quad (9)$$

$$\Delta_{\phi} = \pm \frac{180}{\pi} 1,1 \sqrt{\theta_{\phi_1}^2 + \theta_{\phi_2}^2 + \theta_{\phi_3}^2}. \quad (10)$$

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 векторного анализатора цепей из состава комплекса в комплекте с штатными радиочастотными кабелями и аттенюатором в диапазоне частот от 0,8 до 26 ГГц в соответствии с технической документацией на него.

Установить следующие настройки векторного анализатора цепей:

- полоса анализа от 0,8 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  $|S12(f_i)|$ , дБ. Зафиксировать верхнюю границу АЧХ шума N, дБ.

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

Изменяя ослабление аттенюатора от 10 до 50 дБ с шагом 10 дБ, провести измерения модуля комплексного коэффициента передачи.

Погрешность измерений модуля комплексного коэффициента передачи на каждой частоте



те  $f_i$ , указанной в п. 8.3.1.1, рассчитать как разность (в логарифмических единицах) между измеренным значением модуля коэффициента передачи  $|S_{12}(f_i)|$ , дБ, и действительным значением ослабления аттенюатора  $L(f_i)$ , дБ, записанным в его технической документации (свидетельстве о поверке):

$$\theta_{A1}(f_i) = |S_{12}(f_i)| - L(f_i), \quad (11)$$

За погрешность  $\theta_{A1}$  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:

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

Аналогичные измерения и расчеты выполнить в диапазоне частот от 26 до 40 ГГц с применением высокочастотных кабельных сборок из состава комплекса.

Результаты поверки записать в таблицу.

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

Ослабление аттенюатора L, дБ	Относительный уровень амплитудного распределения М, дБ	Погрешность измерений $\theta_{A1}$ , 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:

$$\theta_{A2} = (1 + 10^{0,1KPP})^2 - 1, \quad (13)$$

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

8.3.1.4 Абсолютную 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 векторного анализатора цепей из состава комплекса в комплекте с штатными радиочастотными кабелями, аттенюатором и мерой в диапазоне частот от 0,8 до 26 ГГц в соответствии с технической документацией на него.

Изменяя ослабление аттенюатора от 10 до 50 дБ с шагом 10 дБ, провести измерения фазы комплексного коэффициента передачи при следующих настройках векторного анализатора цепей:

- полоса анализа от 0,8 до 26 ГГц;
- ширина полосы пропускания 500 Гц;
- уровень мощности выходного колебания минус 10 дБ (мВт);
- режим измерений фазы комплексного коэффициента передачи S21;
- количество точек 3601.

Абсолютную погрешность измерений фазы комплексного коэффициента передачи на

те  $f_i$ , 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:

$$\theta_{\phi_1}^{(N)}(f_i) = \arg(S_{12}(f_i)) - \Phi^{(N)}(f_i), \quad (14)$$

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:

$$\theta_{\phi_1}^{(N)} = \max\{\theta_{\phi_1}^{(N)}(f_i)\}. \quad (15)$$

Провести аналогичные измерения и расчеты для полосы частот от 26 до 40 ГГц с применением высокочастотных кабельных сборок из состава комплекса.

Результаты поверки записать в таблицу.

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

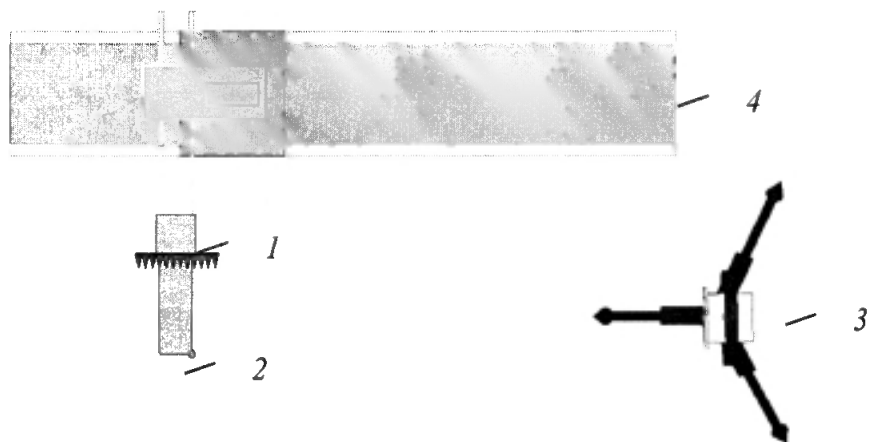
Ослабление аттенюатора L, дБ	Относительный уровень амплитудного распределения M, дБ	Погрешность измерений $\theta_{\phi_1}, ^\circ$
10	минус 10	
20	минус 20	
30	минус 30	
40	минус 40	
50	минус 50	

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 «RadioLine Antenna Measurements» переместить антенну-зонд в крайнее центральное левое положение. Зафиксировать показания Leica AT401.

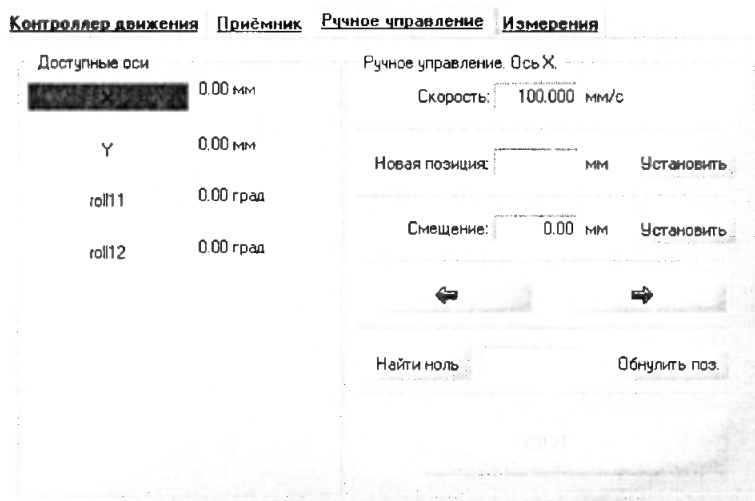


Рисунок 2 – Меню программы для ручного управления движением сканера

Перемещая антенну-зонд с установленным оптическим отражателем вдоль оси  $Ox$  в пределах рабочей зоны сканера с шагом  $\lambda_{min}/2$ , где  $\lambda_{min}$  - 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 «RadioLine Antenna Measurements» переместить антенну-зонд в крайнее центральное нижнее положение. Зафиксировать показания Leica AT401.

Перемещая антенну-зонд с установленным оптическим отражателем вдоль оси  $Oy$  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  $\Delta z$ , м.

Погрешность измерений фазы  $\Delta\phi(f_i)$ , рад, обусловленную неточностью позициониро-

вания антенны-зонда в плоскости сканирования, для каждого номинала частоты, указанного в п. 8.3.1.1, оценить по формуле:

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

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

$\lambda$  - 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 (16):

$$\theta_{\varphi_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{M-1} (\Delta\varphi(f_i))^2}{M}}, \quad (17)$$

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

Размеры рабочей области сканирования по осям  $O_x$  и  $O_y$  рассчитать как разность между показаниями системы лазерной координатно-измерительной Leica AT401 в момент срабатывания 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 векторного анализатора цепей из состава комплекса в диапазоне частот от 26 до 40 ГГц в соответствии с технической документацией на него.

Провести измерения фазы комплексного коэффициента отражения при следующих настройках векторного анализатора цепей:

- полоса анализа от 26 до 40 ГГц;
- ширина полосы пропускания 500 Гц;
- уровень мощности выходного колебания минус 10 дБ (мВт);
- режим измерений фазы комплексного коэффициента отражения S11.

С помощью программы ручного управления сканером (рисунок 2) в соответствующей вкладке программного продукта для измерений в ближней зоне «RadioLine Antenna Measurements» 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 векторного анализатора цепей.

За оценку погрешности измерений фазы, обусловленную случайными перегибами радиочастотного тракта комплекса, принять разницу между максимальным и минимальным значением измеренной фазы комплексного коэффициента отражения на частоте 40 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 рупорной антенной Пб-140 с коаксиально-волноводным переходом диапазона частот от 26,5 до 40,0 ГГц из состава комплекса.

Антенну Пб-140 установить на опорно-поворотное устройство в положение, соответствующее вертикальной поляризации, таким образом, чтобы плоскость раскрыва была параллельна плоскости сканирования.

Используя режим ручного или дистанционного управления сканера, установить антенну-зонд соосно с антенной Пб-140 в положение, соответствующее вертикальной поляризации.

Расстояние между раскрывами антенны Пб-140 и антенны-зонда установить равным в пределах  $3\lambda$ , где  $\lambda$  - максимальная длина волны измеряемого поддиапазона частот.

Запустить программу измерений в частотной области.

В соответствии с РЭ на комплекс установить полосу частот векторного анализатора це-

пей от 25 до 40 ГГц, ширину полосы пропускания 100 Гц, шаг перестройки по частоте 5 ГГц, уровень мощности выходного сигнала векторного анализатора цепей 10 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 `nfcalc.exe`, входящую в комплект поставки комплекса. На частоте 40 ГГц рассчитать амплитудные  $A_j$  и фазовые  $\varphi_j$  распределения, а также среднее квадратическое отклонение результатов измерений АФР по формулам (4) и (8).

8.3.1.8 Результаты испытаний 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:

– минус 10 дБ	±0,3 дБ;
– минус 20 дБ	±0,5 дБ;
– минус 30 дБ	±2,1 дБ;
– минус 40 дБ	±3,0 дБ;
– минус 50 дБ	±3,1 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:

– минус 10 дБ	±6°;
– минус 20 дБ	±6°;
– минус 30 дБ	±6°;
– минус 40 дБ	±7°;
– минус 50 дБ	±14°.

### 8.3.2 Определение погрешности измерений относительных уровней амплитудных диаграмм направленности и абсолютной погрешности измерений фазовых диаграмм 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 АДН, определенных для антенн с равномерным синфазным распределением токов на апертуре, и тех же диаграмм направленности, но с учетом погрешности измерений АФР.

8.3.2.2 Невозмущенную диаграмму направленности (ДН) оценить следующим образом.

Размеры плоскости сканирования выбрать из критерия максимального сектора углов восстанавливаемой ДН, равного  $\pm 65^\circ$ , по формулам (10):

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

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  $\lambda_{\max}$  – длина волны, соответствующая частотам 0,8; 18,0 и 40,0 ГГц;

$R$  – измерительное расстояние,  $R = (3 - 8) \lambda_{max}$ , м;

$\Theta, \varphi$  – сектор углов восстановленной ДН в соответствующих плоскостях,  $\Theta = \varphi = 130^\circ$ .

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

Для частоты 0,8 ГГц пересчитать АФР в раскрыве антенны в АФР на плоскости сканирования по формуле:

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

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

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

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

$\varphi_0$  – фаза сигнала ( $\varphi_0 = 0$  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 нормированные АДН и ФДН по формулам:

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

$$F_\varphi(u, v) = \arg[\mathfrak{F}(J(x_2, y_2))]$$

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

$\mathfrak{F}(\dots)$  – оператор двумерного дискретного преобразования Фурье;

MAX – максимальное значение модуля комплексной величины;

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;

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

8.3.2.3 АДН и ФДН с учетом погрешности измерений АФР оценить следующим образом.

Значения погрешности измерений АФР для каждого относительного уровня амплитудного распределения M задавать программно с учетом оценки погрешности измерений АФР, полученных в п. 8.3.1, для условия соотношения сигнал/шум 10 дБ:

$$\delta A = \text{Norm}(0, \sigma_A^2), \quad (21)$$

$$\Delta \varphi = \text{Norm}(0, \sigma_\varphi^2),$$

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

$\sigma_A$  – среднее квадратическое отклонение результатов измерений амплитудного распределения

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

$\sigma_\varphi$  – среднее квадратическое отклонение результатов измерений фазового распределения

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

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

$$J^*(x_2, y_2) = |J(x_2, y_2)| (1 + \delta A) \exp(j(\arg(J(x_2, y_2)) + \Delta \varphi)). \quad (22)$$

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:

$$\delta F_A = \sum_{i=1}^k \sqrt{\frac{\left(\frac{(F_A^*)_i - F_A}{(F_A^*)_i}\right)^2}{k-1}}, \quad (23)$$

$$\delta F_\Phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k ((F_\Phi^*)_i - F_\Phi)^2}{k-1}} \quad (24)$$

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

Рассчитать погрешность измерений уровней АДН и ФДН по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta F_A &= \pm 20 \lg(1 + 2,45 \delta F_A); \\ \Delta F_\Phi &= \pm \frac{180}{\pi} 2,45 \cdot \delta F_\Phi. \end{aligned} \quad (25)$$

8.3.2.5 Результаты поверки считать положительными, если:

- значения погрешности измерений относительных уровней АДН до уровней (при кроссполяризационной развязке антенны-зонда не менее 20 дБ, динамическом диапазоне измеренного амплитудного распределения антенны не менее 60 дБ), находятся в пределах:

– минус 10 дБ	±0,3 дБ;
– минус 20 дБ	±0,6 дБ;
– минус 30 дБ	±2,4 дБ;
– минус 40 дБ	±3,4 дБ;
– минус 50 дБ	±3,7 дБ,

- значения абсолютной погрешности измерений ФДН (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:

– минус 10 дБ	±6°;
– минус 20 дБ	±6°;
– минус 30 дБ	±7°;
– минус 40 дБ	±9°;
– минус 50 дБ	±18°.

### 8.3.3 Определение погрешности измерений коэффициента усиления антенн

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

Погрешность измерений коэффициента усиления  $\delta$ , дБ, рассчитать по формуле:

$$\delta = \pm 10 \lg(1 + 1,1 \cdot \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}), \quad (26)$$

где  $\delta_1$  – погрешность измерений АДН до уровней минус 10 дБ;

$\delta_2$  – погрешность коэффициента усиления эталонной антенны;

$\delta_3$  – погрешность за счет рассогласования.

Погрешность за счет рассогласования вычислить по формулам:

$$\begin{aligned} \delta_3 &= \frac{(1 - |\Gamma_\Phi|^2)(1 + |\Gamma_H| \cdot |\Gamma_K|)^2}{(1 - |\Gamma_\Phi|^2)(1 - |\Gamma_H| \cdot |\Gamma_\Phi|)^2} - 1, \\ \delta_3 &= \frac{(1 - |\Gamma_\Phi|^2)(1 - |\Gamma_H| \cdot |\Gamma_K|)^2}{(1 - |\Gamma_\Phi|^2)(1 + |\Gamma_H| \cdot |\Gamma_\Phi|)^2} - 1, \end{aligned} \quad (27)$$

где  $\Gamma_\Phi$ ,  $\Gamma_H$ ,  $\Gamma_K$  – коэффициенты отражения входов эталонной, испытываемой антенн, входа векторного анализатора цепей из состава комплекса.

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

$$|\Gamma| = \frac{K-1}{K+1}. \quad (28)$$

8.3.3.2 При расчетах погрешности за счет рассогласования значение коэффициента стоячей волны по напряжению 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 коэффициенте стоячей волны по напряжению испытываемой антенны не более 2 и погрешности измерений коэффициента усиления эталонной антенны, дБ:

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

### 8.3.4 Определение диапазона рабочих частот

8.3.4.1 Проверку диапазона рабочих частот проводить по результатам проверки погрешности измерений АФР.

8.3.4.2 Результаты поверки считать положительными, если в диапазоне частот от 0,8 до 40 ГГц значения погрешности измерений АФР не превышают установленных значений (см. п. 8.3.1). В этом случае диапазон частот комплекса составляет от 0,8 до 40 ГГц.

### 8.3.5 Определение размеров рабочей области сканирования

8.3.5.1 Определение размеров рабочей области сканирования осуществить по результатам измерений, выполненных в соответствии с п. 8.3.1.5 настоящего документа.

8.3.5.2 Результаты поверки считать положительными, если размеры рабочей области сканирования комплекса (длина × высота) не менее 2,9 × 2,9 м.

### 8.3.6 Определение сектора углов восстанавливаемых диаграмм направленности

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

8.3.6.2 Результаты поверки считать положительными и сектор углов восстанавливаемой амплитудной диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскостях составляет от минус 65° до 65°, если при заданных в п. 8.3.2 условиях моделирования (секторы углов  $\Theta$  и  $\varphi$ ) рассчитанная погрешность измерений уровней АДН не превышает установленных в п. 8.3.2 значений.

## 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 установленной формы.

9.3 Если по результатам поверки комплекс признан непригодным к применению, свидетельство о поверке аннулируется и выписывается извещение о непригодности к применению установленной формы с указанием причин забракования.

Начальник НИО-1 ФГУП «ВНИИФТРИ»



О.В. Каминский