

DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-141-151  
УДК 621.317.75:621.391.82

## АНАЛИЗ МОДЕЛИ МНОГОЗОНДОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ И РАСЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ С ЕЕ ПОМОЩЬЮ

*А. А. Львов, Н. Семежев, А. А. Солопекина, О. М. Глухова*

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,  
Саратов, Российская Федерация*

Исследованы метод неопределенности и возможность его использования в современных измерительных системах на СВЧ. Описываются преимущества и показана эффективность использования метода неопределенности для оценки ошибок, возникающих в процессе эксплуатации и калибровки многозондовой измерительной линии (МИЛ), которая может быть использована в качестве приемного устройства в системах программно-конфигурируемой радиосвязи. Получены выражения для неопределенностей измерений МИЛ, обусловленных различными источниками: погрешностями измерения напряжений на выходах детекторов линии, погрешностями ее калибровки, неточностями знания длины волны в линии и расстояний от исследуемой нагрузки до датчиков. Для анализа неопределенностей типов *A* и *B* проведено численное моделирование процесса измерения оцениваемых параметров. На основе полученных данных показано, что выражения для дисперсионных матриц хорошо описывают характер неопределенности измерения в рассматриваемых диапазонах изменения дисперсий различных источников погрешностей. Приведены результаты имитационного компьютерного моделирования, подтверждающие теоретические выводы.

**Ключевые слова:** неопределенность, многозондовая измерительная линия, рефлектометр, погрешность, матрица ошибок, компьютерное моделирование.

**Для цитирования:** *Львов А. А., Семежев Н., Солопекина А. А., Глухова О. М.* Анализ модели многозондовой измерительной линии и расчет неопределенностей измерения с ее помощью // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 4. С. 141–151. DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-141-151.

### Введение

Проблема создания и совершенствования средств связи всегда волновала умы передовых ученых с того момента, как человек в своей повседневной деятельности начал пользоваться радио. Во время «информационного взрыва», который мы переживаем в настоящее время, создание прецизионных средств приема/передачи информации стало одним из важнейших направлений, в огромной мере определяющих прогресс естественных наук и промышленного производства. Проблеме связи посвящен обширный и все нарастающий поток публикаций, объем которых практически необозрим. Созданием и использованием систем радиосвязи во всевозможных приложениях занимаются многочисленные группы специалистов, большие научные и производственные коллективы. Но вслед за проблемой развития радиосвязи следует и проблема повышения точности измерений и их соответствия современным стандартам.

Одним из важнейших современных методов оценивания точности измерений является оценивание неопределенности измерений. Неопределенность измерения – это общее понятие, связанное с любым измерением, которое используют при необходимости принятия обоснованных решений в разных областях практической деятельности и теоретических исследований [1].

Считается, что термин «неопределенность измерений» пришел на смену термину «погрешность измерений». Однако это не совсем правильное утверждение. На самом деле понятие «погрешность» тоже имеет право на существование. Этот термин по-прежнему входит в международный метрологический словарь VIM [2]. Погрешностью по-прежнему называют отклонение измеренного значения от действительного или стандартного. В то же время для подробного анализа точности полученного результата измерения сейчас используется несколько другой подход – не анализ погрешности, а расчет неопределенности измерений.

В России долгое время для описания точности результата измерений широко использовался (и до сих пор часто используется) аппарат расчета характеристик погрешности измерений, в который входили такие показатели, как предел погрешности, доверительные границы погрешности, среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной погрешности, СКО систематической погрешности, границы неисключенной систематической погрешности (НСП). Этот же аппарат, известный как *Error analysis* (анализ погрешности), использовался до середины 90-х гг. и в других странах.

В 1993 г. был выпущен документ Международной организации по стандартизации/ Международной электротехнической комиссии (ИСО/МЭК) «Руководство по выражению неопределенности измерений (GUM)», в котором было введено понятие «неопределенность измерений», и во всем мире в сертификатах калибровки начали указывать не характеристики погрешности, а другие характеристики: суммарную стандартную неопределенность и расширенную неопределенность.

В настоящее время все чаще требуется оценивать точность проведения измерений в терминах «неопределенности» (например, такое требование предъявляется при аккредитации лабораторий). В связи с вступлением России в ВТО принято решение перевести правила проведения и оценки качества работ (в том числе и метрологических) в соответствие с международными стандартами ИСО. Все измерительные лаборатории стран-членов ВТО должны оценивать точность результатов измерений в терминах неопределенности. В России о необходимости расчета неопределенности измерений в соответствии с ГОСТ Р ИСО 10576-1-2006 говорится в письме Роспотребнадзора 01/6620-12-32 от 13 июня 2012 г.

Многозондовая измерительная линия (МИЛ) является частным случаем многополюсного рефлектометра (МР). Как правило, МИЛ применяется для измерения параметров СВЧ нагрузок, но может использоваться и в качестве одной из частей приемника программно-конфигурируемой радиосвязи (ПКР) [3]. Многозондовая измерительная линия представляет собой отрезок однородного СВЧ тракта без потерь с регулярным поперечным сечением (это может быть волноводное, коаксиальное или микрополосковое исполнение). Основное преимущество МИЛ перед классическим МР заключается в простоте ее калибровки, поскольку для этого не нужно иметь прецизионных эталонов отражения с точно известными параметрами [4]. В силу того, что метод оценивания неопределенности измерений является достаточно молодым методом, большинство работ, посвященных этой тематике, не связано с СВЧ. Исследователи неопределенности измерения описывают общетеоретические аспекты использования данного метода в метрологических работах [5] или при аттестации измерений в цепях постоянного тока [6, 7]. Работы, связанные с СВЧ, в основном приводят варианты использования метода неопределенности для оценивания точности калибровки измерителей [8]. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что неопределенности измерений МИЛ еще мало изучены и требуют дополнительного исследования.

Таким образом, цель работы заключается в расчете дисперсионных матриц (матриц ошибок) вектора оцениваемых параметров в методе МИЛ, что позволило провести анализ неопределенностей типа  $A$  и  $B$  этого метода.

### **Методы оценивания неопределенностей измерения**

Неопределенность измерений можно оценить двумя разными способами. Это методы оценки типов  $A$  и  $B$  [1]. В случае неопределенности типа  $A$  источником информации служат результаты повторных измерений. В случае неопределенности типа  $B$  исходная информация получается из других источников (не из повторных измерений). Таким образом, в обоих случаях эти компоненты имеют общую статистически-вероятностную (т. е. случайную) природу, хотя их оценка осуществляется разными способами.

В предлагаемой работе исследование неопределенности измерений применяется для анализа точности измерения МИЛ. Процесс измерения с помощью МИЛ состоит в анализе распределения электромагнитного поля внутри линии, которое зависит от параметров исследуемого двухполюсника (модуля и фазы коэффициента отражения) и амплитуды стоячей волны в линии. Структурная схема автоматической установки для измерения параметров СВЧ нагрузок приведена на рис. 1.

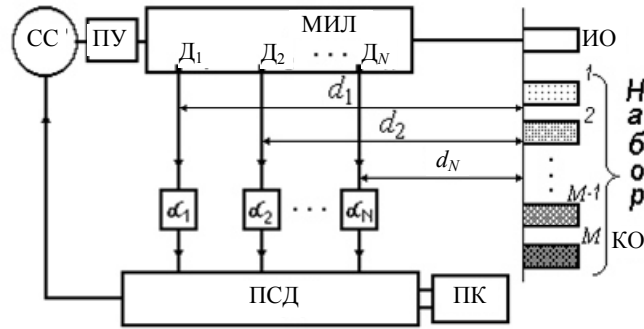


Рис. 1. Структурная схема автоматического анализатора цепей на основе МИЛ:  
 СС – синтезатор СВЧ сигнала; ПУ – переходное устройство; МИЛ – СВЧ тракт многозондовой измерительной линии; ИО – измеряемый объект (нагрузка); ПСД – плата сбора данных; ПК – персональный компьютер;  $D_1, \dots, D_N$  – датчики (зонды); набор КО – набор из  $M$  калибровочных объектов, поочередно подсоединяемых к МИЛ вместо ИО в процессе калибровки измерителя

Схема состоит из синтезатора СВЧ сигналов СС, соединенного через переходное устройство ПУ с измерительным СВЧ трактом МИЛ, вдоль центральной продольной оси которого расположены  $N$  измерительных датчиков  $D_1, \dots, D_N$  (зондов). Ко второму фланцу измерительного тракта подключается исследуемая нагрузка ИО. Сигналы с датчиков через плату сбора данных ПСД поступают в память персонального компьютера ПК, который, в свою очередь, управляет частотой синтезатора.

В СВЧ тракте МИЛ формируется стоячая волна, параметры которой однозначно связаны с параметрами подсоединенных генератора и нагрузки. При этом предполагается следующее:

- рассматриваемая измерительная линия не имеет потерь;
- датчики расположены на точно известных расстояниях  $d_i$  от измеряемой нагрузки;
- собственные коэффициенты отражения датчиков пренебрежимо малы, т. е. датчики не нарушают картину поля в линии;
- детекторы датчиков имеют идеальные квадратичные характеристики.

Подробно данный метод исследовался в работах [9, 10]. Опираясь на эти результаты, получим выражения для неопределенностей метода МИЛ.

Математическая модель МИЛ задается выражением [9–11]

$$u_i = \alpha_i |a|^2 \{1 + \rho^2 + 2\rho \cdot \cos(\varphi - 4\pi d_i / \lambda)\} + \xi_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $u_i$  – напряжение на выходе детектора  $i$ -го датчика;  $\alpha_i$  – коэффициент его передачи;  $\rho, \varphi$  – неизвестные модуль и фаза комплексного коэффициента отражения (ККО) измеряемого двухполюсника соответственно;  $a$  – неизвестная амплитуда стоячей волны в линии;  $d_i$  – расстояние от фланца измеряемого двухполюсника до  $i$ -го зонда;  $\lambda$  – известная длина волны в тракте МИЛ;  $\xi_i$  – шумовая составляющая измерения напряжения на выходе  $i$ -го детектора;  $N$  – число измерительных зондов (датчиков) МИЛ.

В системе (1) неизвестными являются параметры  $\mathbf{c} = (\rho, \varphi, |a|^2)^T$ . Анализ этой модели МИЛ показал [10], что основными источниками неопределенности при измерении ККО СВЧ двухполюсников являются:  $\xi_j$  – случайные ошибки измерения напряжения на датчиках,  $\Delta\alpha_i$  – ошибки калибровки коэффициентов передачи детекторов датчиков,  $\Delta d_i$  – ошибки знания расстояний от плоскости подсоединения нагрузки до датчиков,  $\Delta\lambda$  – ошибка знания длины волны в тракте МИЛ.

Для дальнейшего рассмотрения сделаем следующие предположения, которые не противоречат реальным МИЛ:

1. Ошибки измерения  $\xi_j, \Delta\alpha_i, \Delta d_i$  и  $\Delta\lambda$  статистически независимы.
2. Ошибки  $\Delta\alpha_i, \Delta d_i$  и  $\Delta\lambda$  – случайные величины, распределенные нормально с нулевыми математическими ожиданиями и СКО  $\sigma_{\alpha_i}, \sigma_{d_i}, \sigma_{\lambda}$  соответственно.

3. Ошибки  $\xi_j$ ,  $\Delta\alpha_i$ ,  $\Delta d_i$  и  $\Delta\lambda$  достаточно малы по сравнению с истинными значениями параметров  $u_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $d_i$  и  $\lambda$ .

При анализе влияния случайных погрешностей измерения напряжения на выходе зонда  $\xi_j$ , обусловленных шумами детекторов и усилителей платы сбора данных, будем использовать *неопределенность типа А*. В работе [10] уже были получены выражения для матрицы ошибок вектора  $\mathbf{q} = a^2(1 + \rho^2, \rho\cos\varphi, \rho\sin\varphi)^T$ :

$$\mathbf{D}_\xi[\mathbf{q}] = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} N & 2 \sum_{i=1}^N \cos\psi_i & 2 \sum_{i=1}^N \sin\psi_i \\ 2 \sum_{i=1}^N \cos\psi_i & 4 \sum_{i=1}^N \cos^2\psi_i & 4 \sum_{i=1}^N \cos\psi_i \sin\psi_i \\ 2 \sum_{i=1}^N \sin\psi_i & 4 \sum_{i=1}^N \cos\psi_i \sin\psi_i & 4 \sum_{i=1}^N \sin^2\psi_i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\sigma_0^2$  – дисперсия величин  $\xi_j$ ;  $\psi_j = 4\pi d_j/\lambda$ .

Получим выражение для дисперсионной матрицы  $\mathbf{D}[\mathbf{c}]$ . Если учесть, что  $0 \leq \rho \leq 1$  и  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ , то векторы  $\mathbf{c} = \{\rho, \varphi, a^2\}^T$  и  $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, q_3\}^T$  связаны через вектор-функцию  $\mathbf{q} = \mathbf{Z}^{-1}(\mathbf{c})$ .

В случае малых ошибок в линейном приближении зависимость между ошибками векторов состояния и оцениваемых параметров равна  $\Delta\mathbf{q} = \nabla_c \mathbf{Z}^{-1} \Delta\mathbf{c}$ , следовательно,  $\Delta\mathbf{c} = \nabla_c \mathbf{Z} \Delta\mathbf{q}$ , где  $\nabla_c \mathbf{Z}^{-1}$ ,  $\nabla_c \mathbf{Z}$  – матрицы частных производных вектор-функций  $\mathbf{Z}^{-1}$  и  $\mathbf{Z}$  соответственно по компонентам вектора  $\mathbf{c}$ . Из последнего выражения несложно подсчитать искомую дисперсионную матрицу:

$$\mathbf{D}[\mathbf{c}] = M[\Delta\mathbf{c}\Delta\mathbf{c}^T] = \nabla_c \mathbf{Z}(\mathbf{q}^*) M[\Delta\mathbf{q}\Delta\mathbf{q}^T] \nabla_c^T \mathbf{Z}(\mathbf{q}^*) = \nabla_c \mathbf{Z}(\mathbf{q}^*) \mathbf{D}_\xi[\mathbf{q}] \nabla_c^T \mathbf{Z}(\mathbf{q}^*). \quad (3)$$

В (3) матрица  $\nabla_c \mathbf{Z}$  равна

$$\nabla_c \mathbf{Z} = \frac{1}{a^{*2} \rho^* (1 - \rho^{*2})} \begin{pmatrix} -\rho^{*2} & \rho^* (1 + \rho^{*2}) \cdot \cos\varphi^* & \rho^* (1 + \rho^{*2}) \cdot \sin\varphi^* \\ 0 & -(1 - \rho^{*2}) \cdot \sin\varphi^* & (1 - \rho^{*2}) \cdot \cos\varphi^* \\ a^{*2} \rho^* & -2a^{*2} \rho^{*2} \cos\varphi^* & -2a^{*2} \rho^{*2} \sin\varphi^* \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $q^*$ ,  $a^*$ ,  $\rho^*$ ,  $\varphi^*$  – истинные значения соответствующих параметров.

Выражения (3), (4) задают матрицу  $\mathbf{D}[\mathbf{c}]$ . Из (4) видно, что элементы дисперсионной матрицы вектора измеряемых параметров неограниченно возрастают при значениях модуля ККО, стремящихся к единице. В реальных МИЛ этого не происходит. Для важного практического случая, когда датчики МИЛ расположены в соответствии с D-оптимальным планом эксперимента [11], расчет  $\mathbf{D}_\xi[\mathbf{c}]$  дает

$$\mathbf{D}_\xi[\mathbf{c}] = \frac{\sigma_0^2}{N} \begin{pmatrix} P(1 + 4\rho^{*2} + \rho^{*4}) & 0 & -P\rho^{*2}(2 + \rho^{*2}) \\ 0 & 0,5a^{*-4} \rho^{*-2} & 0 \\ P\rho^{*2}(1 + a^{*2} + \rho^{*2}) & 0 & 2Pa^{*2}(1 + \rho^{*2}) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Из выражения (5), где  $P = a^{*-2}(1 - \rho^{*2})^{-2}$ , видно, что с ростом числа датчиков и увеличением отношения сигнал/шум ( $a^{*2}/\sigma_0$ ) точность оценивания ККО (параметров  $\rho$  и  $\varphi$ ) повышается (неопределенность измерения уменьшается).

Для анализа систематических источников неопределенности будем использовать *неопределенность типа B* [12]. В соответствии с классификацией, приведенной выше, к данному типу относятся  $\Delta\alpha_i$ ,  $\Delta d_i$  и  $\Delta\lambda$ . Поскольку оценка вектора  $\mathbf{c}$  является несмещенной [13], то выражение (2) остается справедливым и для исследования этого типа неопределенностей. Поэтому для нахождения матрицы  $\mathbf{D}_B[\mathbf{c}]$  необходимо определить матрицу  $\mathbf{D}_B[\mathbf{q}]$  для каждого отдельного источника. Положив  $\xi_i = 0$ ,  $i = \overline{1, N}$ , имеем:

$$\mathbf{D}_B[\mathbf{q}] = \mathbf{D}_\xi[\mathbf{q}] \mathbf{X}^T \mathbf{R}_B \mathbf{X} \mathbf{D}_\xi[\mathbf{q}] \quad (6)$$

где  $\mathbf{R}_B = M[\Delta\Delta^T]$  – ковариационная матрица вектора  $\Delta$ ;  $\Delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N)^T$  – вектор неопределенности измерения напряжений на датчиках МИЛ. Выражение (6) справедливо для всех трех источников систематических ошибок  $\Delta\alpha_i$ ,  $\Delta d_i$  и  $\Delta\lambda$ . Остается только определить матрицы ковариаций  $\mathbf{R}_\alpha$ ,  $\mathbf{R}_d$  и  $\mathbf{R}_\lambda$  данных ошибок и из (3), (4), (6) вычислить соответствующие дисперсионные матрицы.

### Неопределенности калибровки МИЛ

Предполагая, что  $\xi_i = \Delta d_i = \Delta\lambda = 0$ ,  $i = \overline{1, N}$ , можно вычислить неопределенность напряжения на выходе  $i$ -го датчика:

$$\delta_i = \Delta\alpha_i |a|^2 \{1 + \rho^2 + 2\rho \cos(\varphi - \psi_i)\} = \Delta\alpha_i |a|^2 h_i, \quad (i = \overline{1, N}).$$

Из последнего выражения несложно получить ковариационную матрицу ошибок  $\mathbf{R}_\alpha$ :

$$\mathbf{R}_\alpha = \sigma_\alpha^2 |a|^4 \text{diag}(h_1^2, \dots, h_N^2).$$

Подставляя  $\mathbf{R}_\alpha$  в (5), получим дисперсионную матрицу  $\mathbf{D}_\alpha[\mathbf{q}]$  неопределенностей вектора  $\mathbf{q}$ , обусловленную погрешностями калибровки датчиков МИЛ. Тогда из (3) и (4) можно подсчитать дисперсионную матрицу  $\mathbf{D}_\alpha[\mathbf{c}]$  для вектора оцениваемых параметров. Для случая, когда датчики МИЛ расположены в соответствии с D-оптимальным планом эксперимента, последняя примет вид

$$\mathbf{D}_\alpha[\mathbf{c}] = \frac{\sigma_\alpha^2}{NS} \begin{pmatrix} QS & 0 & -Q\rho^{*2} a^{*2} (2 + \rho^{*2}) \\ 0 & 0,5\rho^{*-2} & 0 \\ Q\rho^{*2} a^{*2} (1 + a^{*2} + \rho^{*2}) & 0 & 2Qa^{*4} (1 + \rho^{*2}) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $Q = 2(1 - \rho^{*2})^{-2}$ ;  $S = 1 + 4\rho^{*2} + \rho^{*4}$ . Анализ (7) показывает, что неопределенность ККО, связанная с погрешностями знания коэффициентов передачи датчиков, не зависят от амплитуды стоячей волны в МИЛ и от фазы измеряемой нагрузки, при этом неопределенности измерения модуля и фазы не зависят друг от друга.

### Неопределенность знания расстояний между датчиками

Предполагаем, что  $d_i = d_i^* + \Delta d_i$ , где  $d_i^*$  – истинное расстояние от нагрузки до  $i$ -го датчика и  $\xi_i = \Delta\alpha_i = \Delta\lambda = 0$ ,  $i = \overline{1, N}$ . Тогда

$$u_i = \alpha_i \cdot |a|^2 \{1 + \rho^2 + 2\rho \cos(\varphi - \psi_i - \Delta\psi_i)\}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (8)$$

Неопределенность в этом случае будет равна

$$\delta_i = 8\pi\Delta\psi_i \alpha_i |a|^2 \rho \sin(\varphi - \psi_i) / \lambda, \quad i = \overline{1, N},$$

а ковариационная матрица  $\mathbf{R}_d = 64\pi^2 \alpha_i^2 |a|^4 \rho^2 \sigma_d^2 \lambda^{-2} \text{diag}\{\sin^2(\varphi - \psi_1), \dots, \sin^2(\varphi - \psi_N)\}$ .

Аналогично предыдущему случаю из (3), (4) и (6) несложно вычислить матрицы ошибок  $\mathbf{D}_d[\mathbf{q}]$  и  $\mathbf{D}_d[\mathbf{c}]$ . В случае расположения датчиков МИЛ в соответствии с D-оптимальным планом эксперимента [11]:

$$\mathbf{D}_d[\mathbf{c}] = \frac{64\pi^2 |a|^4 \rho^{*2} \sigma_d^2}{\lambda^2 N} \begin{pmatrix} a^{*-2} P S & 0 & -P \rho^{*2} (2 + \rho^{*2}) \\ 0 & 0,5 a^{*-4} \rho^{*-2} & 0 \\ P \rho^{*2} (1 + a^{*2} + \rho^{*2}) & 0 & a^{*2} P (1 + \rho^{*2}) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Данные неопределенности тоже уменьшаются с ростом числа датчиков, кроме того, неопределенности модуля и фазы независимы, при этом матрица  $\mathbf{D}_d[\mathbf{c}]$  не зависит от фазы измеряемой нагрузки, а неопределенности измерения фазы не зависят и от модуля исследуемой нагрузки.

### Неопределенность знания длины волны в тракте МИЛ

В этом случае предполагается, что  $\lambda = \lambda^* + \Delta\lambda$  и  $\xi_i = \Delta\alpha_i = \Delta d_i = 0$ . Тогда выражение (8) остается справедливым, только  $\Delta\psi_i = 4\pi\Delta d_i/\lambda^{*2}$  (учтено, что  $|\Delta\lambda| \ll |\lambda^*|$ ). Откуда получается выражение для неопределенности измерения напряжения на  $i$ -м датчике

$$\delta_i = 8\pi\rho^* \alpha_i |a^*|^2 \Delta\lambda \sin(\varphi^* - \psi_i) / \lambda^{*2}, \quad i = \overline{1, N}.$$

Тогда ковариационная матрица ошибок

$$\mathbf{R}_\lambda = \frac{64\pi^2 \alpha_i^2 |a^*|^4 \rho^{*2} \sigma_\lambda^2}{\lambda^{*4}} \begin{pmatrix} \varpi_{11} & \cdots & \varpi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varpi_{N1} & \cdots & \varpi_{NN} \end{pmatrix}, \quad \text{где } \varpi_{ij} = d_i d_j \sin(\varphi^* - \psi_i) \sin(\varphi^* - \psi_j), \quad i, j = \overline{1, N}.$$

Подставляя выражение для  $\mathbf{R}_\lambda$  в (6) и учитывая (3) и (4), несложно вычислить  $\mathbf{D}_\lambda[\mathbf{c}]$  для случая, когда датчики расположены в соответствии с D-оптимальным планом эксперимента:

$$\mathbf{D}_\lambda[\mathbf{c}] = \frac{4\pi^2 \sigma_\lambda^2}{\lambda^{*2}} \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где  $\beta_{ij} = \sqrt{\beta_{ii}\beta_{jj}}$ , ( $i, j = 1, 2, 3, i \neq j$ );  $\beta_{33} = \left[ 16 \left( 1 + \frac{d_1}{\lambda^*} - \frac{1}{4N} \right) - \frac{\rho^* \sin 2(\varphi^* - \psi_1)}{N \sin(2\pi/N)} \right]^2$ ;

$$\beta_{11} = \frac{8Q |a^*|^4 \rho^{*2}}{N^2} \left[ \frac{\cos(\varphi^* - \psi_1)}{\sin(\pi/N)} - \frac{\cos 2(\varphi^* - \psi_1)}{\sin(2\pi/N)} \right]^2; \quad \beta_{22} = \frac{8Q \rho^{*2}}{N^2} \left[ \frac{(1 + \rho^{*2}) \cos 2(\varphi^* - \psi_1)}{2 \sin(2\pi/N)} - \frac{\rho^* \cos(\varphi^* - \psi_1)}{\sin(\pi/N)} \right]^2.$$

Видно, что матрица ошибок в этом случае зависит от фазы нагрузки и от расстояний от нагрузки до датчиков. Неопределенности измерения амплитуды стоячей волны в МИЛ, обусловленные погрешностями знания длины волны в СВЧ тракте, перестают зависеть от  $N$  с ростом числа датчиков.

### Результаты моделирования

С целью проверки справедливости полученных выражений для дисперсионных матриц были проведены экспериментальные исследования неопределенности измерения 8-зондовой МИЛ путем численного моделирования процесса измерения вектора оцениваемых параметров  $\mathbf{c}$ . Ниже приводятся некоторые результаты исследования.

На рис. 2 в логарифмическом масштабе приведены зависимости оценок  $\rho$  (рис. 2, а) и  $\varphi$  (рис. 2, б) от относительного СКО  $\sigma_\xi/a^2$  случайных неопределенностей измерения  $\xi_i$  напряжения на датчиках при различных значениях модуля ККО. Тонкие линии соответствуют теоретическим кривым, рассчитанным на основании (5).

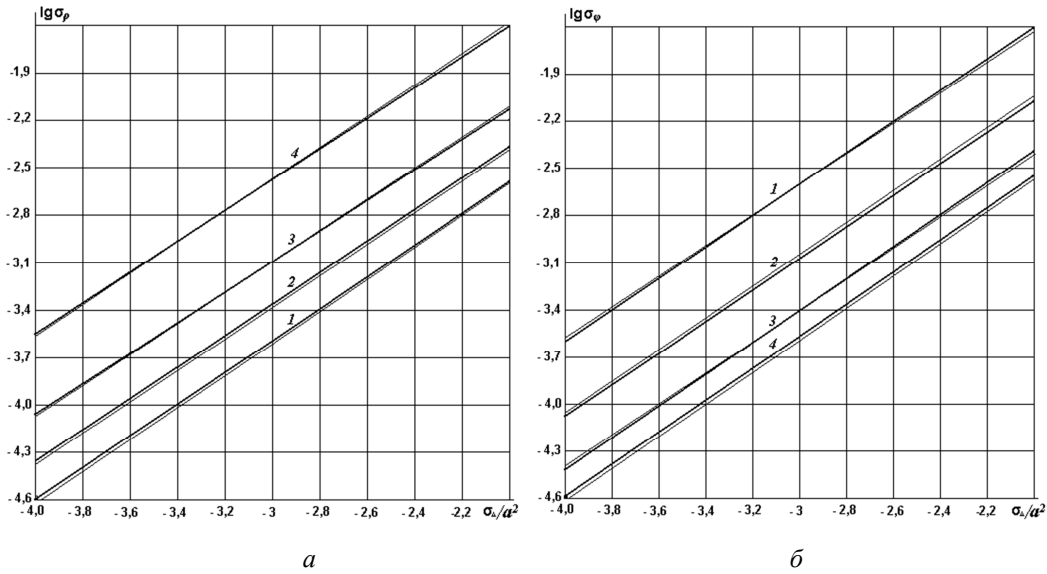


Рис. 2. Зависимости СКО оценок  $\rho$  (а) и  $\varphi$  (б) от относительного СКО случайных ошибок  $\xi$ :  
 $1 - \rho = 0,0909$ ;  $2 - \rho = 0,3333$ ;  $3 - \rho = 0,6667$ ;  $4 - \rho = 0,9047$

На рис. 3 дано сравнение СКО оценок  $\rho$  (рис. 3, а) и  $\varphi$  (рис. 3, б) от относительного СКО  $\sigma_\alpha/\alpha$  неопределенностей калибровки коэффициентов передачи датчиков. Тонкие линии показывают соответствующие теоретические кривые, полученные из (7).

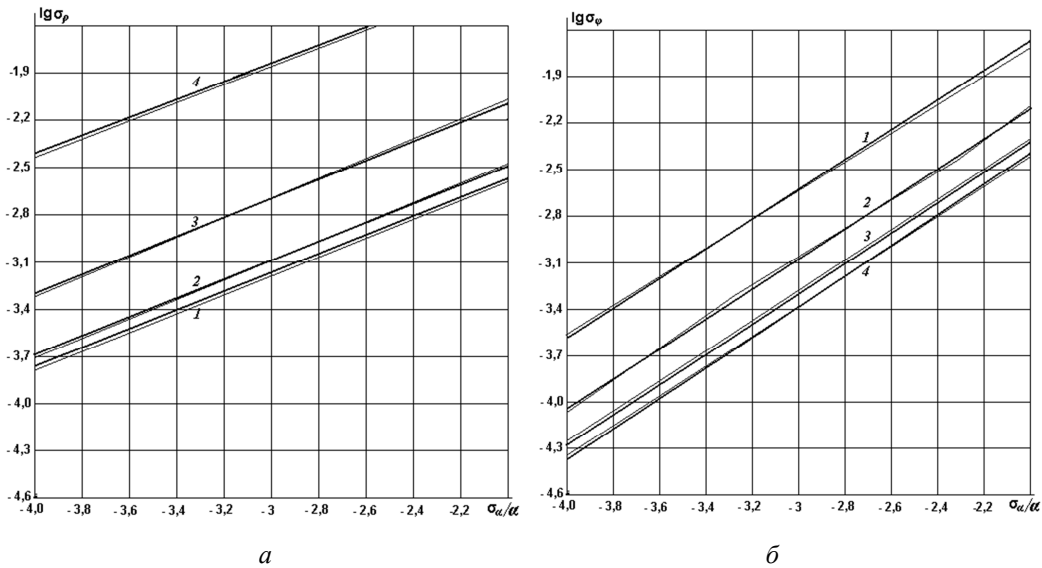


Рис. 3. Зависимости СКО оценок  $\rho$  (а) и  $\varphi$  (б) от относительного СКО неопределенностей коэффициентов передачи датчиков:  
 $1 - \rho = 0,0909$ ;  $2 - \rho = 0,3333$ ;  $3 - \rho = 0,6667$ ;  $4 - \rho = 0,9047$

Из анализа рисунков следует, что выражения для дисперсионных матриц хорошо описывают характер неопределенности измерения в рассматриваемых диапазонах изменения дисперсий различных источников погрешностей. Сам факт того, что в логарифмическом масштабе зависимость СКО неопределенности оценки параметров  $\rho$  и  $\varphi$  ККО исследуемой нагрузки представляет собой прямые линии, говорит об удачном выборе алгоритмов обработки сигналов с датчиков МИЛ на основе оценивания методом максимального правдоподобия и ее калибровки [3, 4, 9, 10]. Данные алгоритмы не допускают методических ошибок калибровки датчиков

МИЛ и измерения ККО с ее помощью, а сама неопределенность определяется только отношением сигнал/шум на выходах датчиков (в случае неопределенности типа *A*) и относительными величинами погрешностей знания расстояний до датчиков и длины волны в тракте МИЛ (для неопределенностей типа *B*).

### Заключение

Предлагаемая работа посвящена анализу неопределенностей измерения метода МИЛ. На основе анализа нелинейных моделей измерительной линии был предложен новый метод оценки неопределенностей измерения методом МИЛ.

Впервые получены выражения для ковариационных матриц неопределенностей измерения с помощью МИЛ, обусловленных влиянием различных случайных факторов: шумов детекторов измерительных зондов, ошибок калибровки коэффициентов передачи детекторов, погрешностей знания расстояний от измеряемой нагрузки до зондов и длины волны в линии.

Для анализа неопределенностей типов *A* и *B* было проведено численное моделирование процесса измерения оцениваемых параметров. На основе полученных данных показано, что выражения для дисперсионных матриц хорошо описывают характер неопределенности измерения в рассматриваемых диапазонах изменения дисперсий различных источников погрешностей.

Таким образом, представленная работа подтверждает перспективность использования метода неопределенности для оценки измерений на СВЧ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ R 54500.1–2011*. / Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009. Неопределенность измерения. Ч. 1. Введение в руководство по неопределенности измерения. М.: Стандартинформ, 2012. 24 с.
2. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. JCGM 200:2012. URL: <https://www.bipm.org/en/publications/guides/vim> (дата обращения: 12.07.2019).
3. *Semezhev N., L'vov A. A., Melnikova N. I., Meschanov V. P.* Mathematical Modeling of the Combined Multi-port Correlator // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg: IEEE, 2018. P. 1175–1180.
4. *Semezhev N., L'vov A. A., Sytnik A. A., L'vov P. A.* Calibration procedure for Combined Multi-Port Wave Correlator // Proceedings of the 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910661.
5. *Захаров И. П., Сергиенко М. П., Величко О. Н., Ченела В. Н.* Методика оценивания неопределенности измерений при выполнении метрологических работ // Системы обработки информации. 2006. Вып. 7 (56). С. 32–36.
6. *Solopekina A. A., Semezhev N., L'vov A. A., Komarov V. V., Svetlov M. S.* Application of the Uncertainty Method for Analysis of Multi-Port Correlator Accuracy // Proceedings of the 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910664.
7. *Волков О. О., Захаров И. П.* Методы и модели оценивания неопределенности измерений при проверке (калибровке) мер электрического сопротивления, применяемых в цепях постоянного тока // Метрология – 2012: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Харьков: Изд-во ННЦ «Институт метрологии», 2012. С. 215–219.
8. *Гусинский А. В., Кострикин А. М., Зезюлина Т. К.* Оценка неопределенностей результатов измерений на СВЧ при дистанционной калибровке // Вестн. Белорус. национ. техн. ун-та. 2010. № 3. С. 57–63.
9. *Львов А. А., Моржаков А. А., Ширишин С. И., Жуков А. В., Кудряшов Ю. Ю.* Измерение параметров СВЧ двухполосников методом многозондовой измерительной линии // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. 1987. Вып. 7 (401). С. 48–51.
10. *Львов А. А., Моржаков А. А., Жуков А. В.* Статистический анализ точностных характеристик метода многозондовой измерительной линии // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. 1990. Вып. 1 (425). С. 50–57.
11. *Кудряшов Ю. Ю., Львов А. А., Моржаков А. А., Ширишин С. И.* Оптимизация параметров многозондовой измерительной линии // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. 1988. Вып. 14 (414). С. 30–34.
12. *Solopekina A. A., Semezhev N., Umnova E. G.* Principles of measurement uncertainty // Advanced Information Technologies and Scientific Computing (PIT 2016): Proceedings of the Int. Sci. Conference. Samara: Samara Scientific Center of RAS, 2016. P. 29–33.



13. *Solopekina A. A., L'vov A. A., Semezhev N.* Calculation of measurement uncertainties of multi-port transmission line reflectometer // Proceedings of the 2014 Int. Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2014. Saratov: IEEE, 2014. P. 356–362.

Статья поступила в редакцию 23.07.2019

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Львов Алексей Арленович* – Россия, 410054, Саратов; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры информационно-коммуникационных систем и программной инженерии; [alvova@mail.ru](mailto:alvova@mail.ru).

*Семежев Никита* – Россия, 410054, Саратов; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.; аспирант кафедры информационно-коммуникационных систем и программной инженерии; [semezhev@yandex.ru](mailto:semezhev@yandex.ru).

*Солопекина Анна Андреевна* – Россия, 410054, Саратов; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.; главный специалист сектора планирования и управления отдела решений по управлению и логистике Управления обеспечения процессов Интернет-компании «СИБИНТЕК»; [annsolopekina@gmail.com](mailto:annsolopekina@gmail.com).

*Глухова Ольга Михайловна* – Россия, 410054, Саратов; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.; аспирант кафедры прикладных информационных технологий; [olgatiho@yandex.ru](mailto:olgatiho@yandex.ru).



### ANALYSIS OF MULTI-PROBE MEASURING LINE MODEL AND CALCULATION OF UNCERTAINTY OF MEASUREMENT WITH ITS HELP

*A. A. L'vov, N. Semezhev, A. A. Solopekina, O. M. Glukhova*

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,  
Saratov, Russian Federation*

**Abstract.** The article considers the uncertainty method and its use in modern measuring systems in microwaves. The advantages of the method are described, they demonstrate the effectiveness of the uncertainty method in estimating errors that occur during operation and calibration of a multi-probe transmission line reflectometer (MTLR) which can be used as a receiver in software-defined radio communication systems. The equations are obtained for the measurement uncertainties of MTLR due to various sources: errors in measuring voltages at the outputs of detectors, errors in calibration, inaccuracies in the knowledge of the wavelength in the line, and distances from the test load to the sensors. To analyze the uncertainties of types A and B, a numerical simulation of measuring the estimated parameters was carried out. Based on the data obtained, the results show that the expressions for dispersion matrices fully describe the nature of the measurement uncertainty in the ranges of variances of different error sources. The results of computer simulation confirming the theoretical conclusions are presented.

**Key words:** uncertainty, multi-probe measuring line, reflectometer, error, error matrix, computer simulation.

**For citation:** *L'vov A. A., Semezhev N., Solopekina A. A., Glukhova O. M.* Analysis of multi-probe measuring line model and calculation of uncertainty of measurement with its help. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2019;4:141-151. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2019-4-141-151.

## REFERENCES

1. GOST R 54500.1–2011/Rukovodstvo ISO/MEK 98-1:2009. *Neopredelennost' izmereniia. Chast' 1. Vvedenie v rukovodstvo po neopredelennosti izmereniia* [GOST R 54500.1–2011 / Guide ISO / IEC 98-1: 2009. Measurement Uncertainty. Part 1. Introduction to guidance on measurement uncertainty]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 24 p.
2. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. JCGM 200:2012. Available at: <https://www.bipm.org/en/publications/guides/vim> (accessed: 12.07.2019).
3. Semezhev N., L'vov A. A., Melnikova N. I., Meschanov V. P. Mathematical Modeling of the Combined Multi-port Correlator. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. St. Petersburg, IEEE, 2018. Pp. 1175-1180.
4. Semezhev N., L'vov A. A., Sytnik A. A., L'vov P. A. Calibration procedure for Combined Multi-Port Wave Correlator. *Proceedings of the 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. St. Petersburg, IEEE, 2017. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910661.
5. Zakharov I. P., Sergienko M. P., Velichko O. N., Chepela V. N. Metodika otsenivaniia neopredelennosti izmerenii pri vypolnenii metrologicheskikh rabot [Methodology for estimation of measurement uncertainty during metrological work]. *Sistemy obrabotki informatsii*, 2006, iss. 7 (56), pp. 32-36.
6. Solopekina A. A., Semezhev N., L'vov A. A., Komarov V. V., Svetlov M. S. Application of the Uncertainty Method for Analysis of Multi-Port Correlator Accuracy. *Proceedings of the 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. St. Petersburg, IEEE, 2017. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910664.
7. Volkov O. O., Zakharov I. P. Metody i modeli otsenivaniia neopredelennosti izmerenii pri proverke (kalibrovke) mer elektricheskogo soprotivleniia, primeniaemykh v tsepiakh postoiannogo toka [Methods and models for estimating measurement uncertainty when checking (calibrating) electrical resistance measures used in DC circuits]. *Metrologiia – 2012: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnichekskoi konferentsii*. Khar'kov, Izd-vo NNTs «Institut metrologii», 2012. Pp. 215-219.
8. Gusinskii A. V., Kostrikin A. M., Zeziulina T. K. Otsenka neopredelennosti rezul'tatov izmerenii na SVCh pri distantsionnoi kalibrovke [Evaluation of uncertainties in microwave measurement results from remote calibration]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 57-63.
9. L'vov A. A., Morzhakov A. A., Shirshin S. I., Zhukov A. V., Kudriashov Iu. Izmerenie parametrov SVCh dvukhpoliusnikov metodom mnogozondovoi izmeritel'noi linii [Measurement of microwave parameters of two-terminal networks using multi-probe measuring line]. *Elektronnaia tekhnika. Seriya 1: Elektronika SVCh*, 1987, iss. 7 (401), pp. 48-51.
10. L'vov A. A., Morzhakov A. A., Zhukov A. V. Statisticheskii analiz tochnostnykh kharakteristik metoda mnogozondovoi izmeritel'noi linii [Statistical analysis of accuracy characteristics of multi-probe measuring line method]. *Elektronnaia tekhnika. Seriya 1: Elektronika SVCh*, 1990, iss. 1 (425), pp. 50-57.
11. Kudriashov Iu., L'vov A. A., Morzhakov A. A., Shirshin S. I. Optimizatsiia parametrov mnogozondovoi izmeritel'noi linii [Optimization of multi-probe measuring line parameters]. *Elektronnaia tekhnika. Seriya 1: Elektronika SVCh*, 1988, iss. 14 (414), pp. 30-34.
12. Solopekina A. A., Semezhev N., Umnova E. G. Principles of measurement uncertainty. *Advanced Information Technologies and Scientific Computing (PIT 2016): Proceedings of the Int. Sci. Conference*. Samara, Samara Scientific Center of RAS, 2016. Pp. 29-33.
13. Solopekina A. A., L'vov A. A., Semezhev N. Calculation of measurement uncertainties of multi-port transmission line reflectometer. *Proceedings of the 2014 Int. Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2014*. Saratov, IEEE, 2014. Pp. 356-362.

The article submitted to the editors 23.07.2019

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**L'vov Alexey Arlenovich** – Russia, 410054, Saratov; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Information and Communication Systems and Software Engineering; [alvova@mail.ru](mailto:alvova@mail.ru).

**Semezhev Nickita** – Russia, 410054, Saratov; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Postgraduate Student of the Department of Information and Communication Systems and Software Engineering; [semezhevny@yandex.ru](mailto:semezhevny@yandex.ru).

***Solopekina Anna Andreevna*** – Russia, 410054, Saratov; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Chief Specialist of the Planning and Management Sector of the Department for Management and Logistics Solutions of the Process Support Agency of SIBINTEC; [ansolopekina@gmail.com](mailto:ansolopekina@gmail.com).

***Glukhova Olga Mikhailovna*** – Russia, 410054, Saratov; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Postgraduate Student of the Department of Applied Information Technologies; [olgatiho@yandex.ru](mailto:olgatiho@yandex.ru).

