

Оценка погрешности измерений группового времени запаздывания при помощи рефлектометра

Д. Филиппов¹, А. Бакулин², А. Завгородний, к. т. н.³, М. Афанасьев⁴

УДК 744.42 | ВАК 2.2.4

В условиях непрерывного развития радиоэлектроники высоких и сверхвысоких частот растут требования к качеству измерений характеристик передающих и приемных трактов. По этим причинам особенно важны вопросы калибровки фидерных устройств и трактов по временным и энергетическим параметрам. Без решения этой задачи не представляется возможной разработка методов и средств измерений, работа радиотехнических систем и комплексов.

Специфика эксплуатации навигационной аппаратуры потребителя высокого класса часто подразумевает разнесение приемной антенны и собственно приемника: антенна для обеспечения наилучших условий приема выносится на крышу здания, а приемное устройство располагается в лаборатории. Принимаемый сигнал поступает от антенны на вход приемника через кабель снижения, длина которого может составлять десятки метров. Задержка сигналов и, особенно, разность задержек сигналов различных диапазонов частот (L_1 , L_2 и L_3) в кабеле критично важны для корректного решения навигационной задачи [1–3]. Наиболее точным средством измерений задержки сигналов, вернее – группового времени запаздывания (ГВЗ) в терминах радиотехнических измерений, в кабеле является векторный анализатор цепей (ВАЦ), значения его абсолютной погрешности измерений ГВЗ зависят от параметров самого кабеля, прежде всего – от ослабления и от настроек прибора, однако для приборов высокого класса она, как правило, находится в пределах $\pm 0,1$ нс [4]. Кабели снижения перед монтажом в кабельных каналах в здании калибруются по ГВЗ. Часто эти измерения проводятся на кабелях, свернутых в бухты (для удобства манипуляций в лаборатории). Такой подход вызывает ряд вопросов. Во-первых, изменится ли ГВЗ кабеля, если его развернуть и(или) согнуть иначе? Во-вторых, как поведут себя характеристики кабеля, когда разные его участки окажутся в разных температурных условиях (в зимний период перепад может достигать 40°C)? И, наконец, самое главное – как изменяются характеристики смонтированных в каналах кабелей с течением времени?

Очевидно, измерения в лабораторных условиях при помощи ВАЦ не могут дать ответы на эти вопросы, так как подразумевают временный демонтаж кабеля, то есть нарушают условия его штатной работы. Для измерений характеристик кабеля в условиях его эксплуатации используют специализированные однопортовые анализаторы цепей – рефлектометры [5, 6], в зарубежной литературе – «кабельные анализаторы». Портативные размеры и неприхотливость в эксплуатации делают возможным их применение на открытом воздухе и в тесном пространстве технических этажей и кабельных каналов. Часто функционал рефлектометра ограничивается измерениями модуля и фазы коэффициента отражения входного порта линии, оценкой длины линии, а также оценкой расстояния до неоднородности в линии. Однако с миниатюризацией устройств управления и развитием цифровых технологий возможности рефлектометров возросли. При помощи используемых в паре рефлектометров в настоящее время можно измерить модуль коэффициента передачи в тракте. Также разработаны специализированные калибровочные модули, расширяющие функционал рефлектометра [7]. Эти модули позволяют, помимо непосредственно калибровки измерительного порта рефлектометра, измерить комплексный коэффициент передачи тракта, то есть оценить ГВЗ. К сожалению, метрологическое качество такой оценки не исследовалось во время процедуры испытаний в целях утверждения типа используемого в лаборатории рефлектометра CAVAN R180. Поскольку регулярное измерение ГВЗ в кабелях снижения в ФГУП «ВНИИФТРИ» необходимо при работе с навигационной аппаратурой потребителя, то потребовалось провести оценку погрешности таких измерений с использованием рефлектометра и калибровочного модуля.

¹ ФГУП «ВНИИФТРИ», техник.

² ФГУП «ВНИИФТРИ», техник.

³ ФГУП «ВНИИФТРИ», нач. отдела, zavgor@vniiftri.ru.

⁴ Компания «Планар», сотрудник, maxim.afanasyev@planarchel.ru.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве объектов измерений были выбраны кабельные сборки различной длины (от 1 до 70 м), тип коаксиального кабеля – susoflex 101 и susoflex 104 [8]. ГВЗ каждой сборки в диапазонах частот L (то есть от 1 до 2 ГГц) сначала измерялось при помощи ВАЦ N5222A, а затем при помощи рефлектометра CABAN R180 с калибровочным модулем ACMB2506-011. Значения, полученные при помощи ВАЦ, принимались за опорные, во-первых, потому, что ВАЦ – лабораторное средство измерений высокого класса, предназначенное для измерений характеристик длинных линий, его метрологические характеристики заведомо более совершенны, чем у портативного рефлектометра, во-вторых, по причинам хорошей изученности моделей погрешностей ВАЦ, особенно при работе с такими простыми объектами как кабельные сборки.

При измерении характеристик с использованием ВАЦ в полосе анализа была выбрана 12801 точка, ширина полосы фильтра промежуточной частоты (ПЧ) составляла 1 кГц. Непосредственно перед началом измерений была выполнена калибровка SOLT [9] с использованием набора мер ZV-Z270 для работы с соединителями типа N.

Для оценки ГВЗ трактов при помощи рефлектометра с калибровочным модулем были выполнены измерения полных матриц S-параметров подключаемых к нему кабельных сборок. На первом этапе выполнялась калибровка измерительного порта самого рефлектометра, при этом модуль был подключен непосредственно к рефлектометру и к управляющей их работой ПЭВМ. Затем калибровочный модуль отсоединялся от рефлектометра и переводился в режим автономной работы от внутренней батареи, в «разрыв» включалась кабельная сборка. Процедура измерений матрицы S-параметров в таком режиме близка процессу калибровки ВАЦ [9, 10] по группе нагрузок с известными сопротивлениями open, short, match (которые по очереди подключаются к порту калибровочным модулем), но вместо параметров четырехполюсника «ошибок» определяются S-параметры линии. Система уравнений, позволяющая рассчитать параметры линии, состоит из строк следующего вида:

$$\dot{\Gamma}_{изм} = \dot{S}_{11} + \frac{\dot{S}_{21} \cdot \dot{S}_{12}}{1 - \dot{S}_{22} \cdot \dot{\Gamma}_н},$$

где $\dot{\Gamma}_{изм}$ – измеряемый рефлектометром коэффициент отражения от входа тракта, $\dot{\Gamma}_н$ – коэффициент отражения нагрузки. В качестве $\dot{\Gamma}_н$ используются заранее известные значения для каждой из нагрузок. «Разъединить» в процессе вычислений множитель $\dot{S}_{21} \cdot \dot{S}_{12}$ на коэффициенты передачи в прямом и обратном направлении ($\dot{S}_{21}$ и $\dot{S}_{12}$ соответственно) при однопортовых измерениях невозможно. Обычно на практике либо приравнивают эти коэффициенты друг к другу, либо считают $\dot{S}_{12} = 1$ [9]. То есть считают,

что неизвестных величин три, поэтому достаточно трех уравнений, полученных по результатам измерений трех различных нагрузок. Ограничение однопортовых измерений (по сравнению с многопортовым ВАЦ) очевидно – при помощи рефлектометра невозможно корректно измерить полную матрицу S-параметров невзаимного двухпортового устройства.

Другим ограничением является темп подключения нагрузок калибровочным модулем. Для достижения наилучшего метрологического качества результатов измерений целесообразно увеличивать число точек в полосе анализа и сужать полосу фильтра промежуточной частоты [10]. Однако эти меры приводят к резкому росту времени свипирования, то есть времени измерений $\dot{\Gamma}_{изм}$ во всей полосе частот. В предельных случаях рефлектометр не успевал завершить измерения, а модуль уже переключался на следующую нагрузку. Такие измерения, очевидно, некорректны. Во избежание этого эффекта при выполнении эксперимента были выбраны следующие настройки рефлектометра: количество точек в полосе анализа 10001, ширина фильтра промежуточной частоты 10 кГц. Мощность выходного сигнала рефлектометра 1 мВт (т. е. 0 дБм).

Рефлектометр и калибровочный модуль (в неавтономном режиме) управлялись при помощи ПЭВМ с установленным штатным программным обеспечением фирмы-производителя. В числе прочего разброс и среднеквадратическое отклонение (СКО) измеряемой величины также вычислялись при помощи встроенных инструментов этого программного обеспечения.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений приведены в табл. 1.

Измеренные значения ГВЗ требуют комментария, так как, на первый взгляд, плохо согласуются с длинами кабельных сборок. Согласно характеристикам кабеля [8], скорость распространения сигнала в нем составляет приблизительно 77% от скорости распространения в открытом пространстве, что соответствует увеличению электрической длины сборок по сравнению с физической приблизительно в 1,3 раза. Например, для сборки длиной 5 м измеренное значение ГВЗ составляет 21,42 нс, то есть 6,43 м при переводе в электрическую длину.

Разности значений, измеренных ВАЦ и рефлектометром (см. табл. 1), практически не зависят от длин кабельных сборок. Большинство разностей (за исключением нескольких выбросов) находятся в диапазоне от 0,055 до 0,070 нс. Эти величины пренебрежимо малы по сравнению со случайной составляющей погрешности, которая рассматривается ниже.

Для оценки случайной составляющей погрешности измерений рефлектометра было рассчитано среднеквадратическое отклонение (СКО) выборок от среднего

Таблица 1. Результаты измерений ГВЗ при помощи ВАЦ и рефлектометра

Физическая длина кабель- ной сборки, м	Результаты измерений ГВЗ					
	ВАЦ N5222A			Рефлектометр САВАН R180		
	Среднее значение, нс	СКО, пс	Размах, пс	Среднее значение, нс	СКО, нс	Размах, нс
1	4,29	4,81	37,63	4,2283	0,1805	3,0475
2	8,67	4,67	39,98	8,6044	0,1794	3,2289
3	12,86	5,68	45,29	12,797	0,1833	3,2016
4	17,25	6,75	59,67	17,181	0,1849	3,2678
5	21,42	6,81	54,55	21,358	0,1915	2,9707
6	25,81	7,89	59,23	25,742	0,1913	3,1843
7	30,18	8,28	67,57	30,119	0,196	2,8321
8	34,38	23,06	154,4	34,311	0,2047	3,4071
9	38,76	23,65	167,21	38,695	0,2119	3,3582
10	43,03	8,81	64,35	42,963	0,2142	3,3977
11	47,41	11,73	80,86	47,348	0,2181	3,2416
12	51,79	10,23	76,91	51,724	0,2308	3,3176
13	55,98	29,15	195,65	55,916	0,2475	3,4546
20	85,65	36,21	394,88	85,56	0,2952	3,6377
21	90,01	40,9	453,92	89,942	0,3212	4,9642
22	94,39	36,47	397,46	94,32	0,3401	3,968
23	98,58	52,22	492,77	98,512	0,375	4,5907
24	102,96	54,91	550,02	102,894	0,5056	5,3456
25	107,23	37,87	410,1	107,164	0,4431	4,9961
26	111,61	41,19	426,8	111,554	0,4817	4,5929
27	115,99	38,1	447,76	115,924	0,5241	6,2432
28	120,18	52,33	475,24	120,114	0,5938	5,7537
30	128,74	58,66	558,71	128,674	0,7139	7,5708
37	164,46	182,36	1310	164,394	0,5796	5,5829
41	181,37	172,4	1190	181,504	0,7074	6,6958
46	198,85	86,51	1880	198,814	0,8904	9,2996
50	215,96	75,83	1250	215,904	1,0883	10,543
55	237,44	75,08	1370	237,374	1,4615	12,786
65	280,16	81,51	1130	279,494	2,3017	21,241
70	301,65	138,77	1540	301,584	3,3043	33,424

измеренного значения и размах выборки (разность между максимальным и минимальным значением). Важно отметить, что кабельные сборки были выбраны в качестве объектов измерений прежде всего потому, что их ГВЗ в выбранном диапазоне частот не зависело от частоты. Таким образом, можно утверждать, что СКО характеризует именно случайную составляющую погрешности. Графики зависимостей СКО и размаха результатов измерений ГВЗ (с использованием рефлектометра и калибровочного модуля при настройках, указанных выше) от длины линии приведены на рис. 1, 2.

Полученные зависимости хорошо аппроксимируются степенными полиномами (пунктирные линии на рис. 1 и 2). Была определена степень полинома, достаточная для аппроксимации результатов. Для нескольких степеней были рассчитаны суммы квадратов разностей результатов измерений и аппроксимирующей функции. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Судя по полученным результатам увеличение степени полинома выше третьей нецелесообразно, так как усложнение аппроксимирующей степенной функции не приводит к существенному улучшению качества аппроксимации. В результате обработки полученных данных были получены формулы аппроксимирующих зависимость СКО (σ) и размаха выборки (ψ) результатов измерений рефлектометра от длины кабеля в наносекундах:

$$\sigma(l) = 1,89 \cdot 10^{-5} l^3 - 1,12 \cdot 10^{-3} l^2 + 2,98 \cdot 10^{-2} l + 6,57 \cdot 10^{-2} \text{ нс},$$

$$\psi(l) = 2,20 \cdot 10^{-4} l^3 - 1,40 \cdot 10^{-2} l^2 + 3,24 \cdot 10^{-1} l + 1,85 \text{ нс},$$

где l – длина кабеля в метрах. Систематическая составляющая погрешности для длин кабелей, превышающих единицы метров, становится пренебрежимо малой по сравнению со случайной составляющей. По этим причинам

оценку пределов погрешности измерений (Δ) ГВЗ при помощи рефлектометра с калибровочным модулем следует записать в виде:

$$\Delta(l) = \pm 2 \cdot (1,89 \cdot 10^{-5} l^3 - 1,12 \cdot 10^{-3} l^2 + 2,98 \cdot 10^{-2} l + 6,57 \cdot 10^{-2} \text{ нс}) \quad (1)$$

для доверительной вероятности 0,95. Здесь l – длина линии в метрах, расчетное значение пределов погрешности измерений в наносекундах.

Следует отметить, что не вполне корректно указывать в качестве аргумента зависимости погрешности только лишь длину кабеля. Особенностью работы рефлектометра является работа с отраженным сигналом, что при равных мощностях зондирующих сигналов означает принципиально меньшее соотношение сигнал-шум на входе его измерительного устройства по сравнению с ВАЦ (прежде всего потому, что сигнал на вход рефлектометра поступает после прохождения по измеряемой линии два раза, а в случае с ВАЦ – один раз). В проведенной работе были выбраны кабельные сборки, сделанные из коаксиального кабеля одного типа [7], следовательно, обладающие приблизительно одинаковым ослаблением сигнала на единицу длины: около (0,15 – 0,20) дБ/м в диапазоне частот L . На практике зачастую приходится выполнять работы с кабелями снижения с неизвестным ослаблением. Например, логично ожидать увеличения погрешности измерений для кабелей с большим затуханием сигнала на единицу длины. Для подтверждения этого предположения были проведены измерения ГВЗ в линии постоянной длины, но при различном ослаблении – объектом измерений послужила кабельная сборка длиной 1 м с периодически присоединяемыми фиксированными аттенюаторами. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Данные табл. 3 подтверждают ухудшение метрологических характеристик результатов измерений ГВЗ

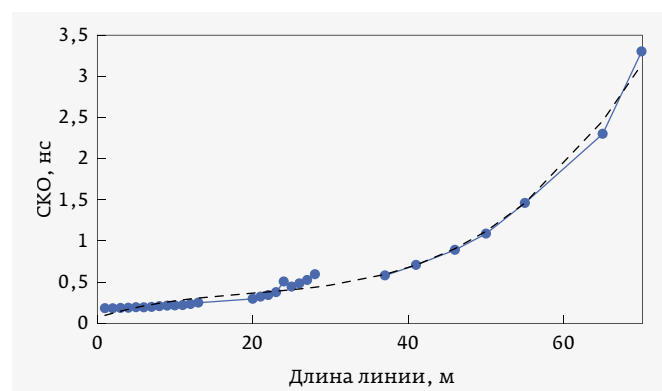


Рис. 1. Зависимость СКО выборки результатов измерений ГВЗ при помощи рефлектометра от длины линии

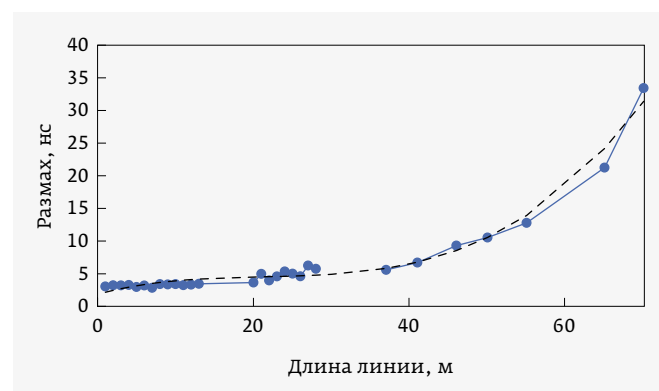


Рис. 2. Зависимость размаха выборки результатов измерений ГВЗ при помощи рефлектометра от длины линии

Таблица 2. Результаты расчета сумм квадратов разностей при полиномиальной аппроксимации

Степень аппроксимирующего полинома	Сумма квадратов разностей при аппроксимации, нс ²	
	СКО	Размах
2	0,797	107,3
3	0,358	48,53
4	0,340	43,15
5	0,338	42,50
6	0,325	44,60

Таблица 3. Результаты оценки характеристик выборки измерений ГВЗ в линии при различном ослаблении в линии

Ослабление в линии, дБ	Характеристики выборки измеренных значений ГВЗ, нс	
	СКО	Размах
0,25	0,18	3,34
6,25	0,27	3,23
10,25	0,56	4,99
16,25	2,18	20,6
20,25	5,58	45,8
26,25	22,2	183

с ростом ослабления в тракте. Очевидно, что полученная выше оценка зависимости погрешности от длины линии (1) справедлива для используемого в лаборатории кабеля [8] или аналогичных ему по характеристикам, но для произвольного кабеля необходимо ввести зависимость случайной составляющей погрешности измерений от ослабления. После аналогично проведенной аппроксимации результатов степенным полиномом (для этого случая достаточно полинома четвертой степени) оценочная формула для расчета пределов погрешности измерений от ослабления k выглядит следующим образом:

$$\Delta(k) = \pm 2 \cdot (1,88 \cdot 10^{-4} \cdot k^4 - 6,19 \cdot 10^{-3} \cdot k^3 + 0,075 \cdot k^2 - 0,29 \cdot k + 0,28 \text{ нс}).$$

(2).

Здесь k – ослабление в линии в децибелах. Следует учитывать, что в качестве ослабления следует подставлять в формулу (2) ослабление кабеля «на проход» в одну сторону, то есть модуль параметра S_{21} или S_{12} , несмотря

на то что рефлектометр оперирует отраженными сигналами, и действительное значение ослабления сигнала на его входе составляет $2k$ дБ.

В ФГУП «ВНИИФТРИ» проведено исследование метрологических характеристик рефлектометра CABAN RI80, работающего совместно с калибровочным модулем АСМВ2506-0П в режиме измерений группового времени запаздывания в коаксиальных кабелях. Настройки рефлектометра были выбраны как компромисс между наилучшими метрологическими характеристиками и скоростью выполнения измерений. По результатам обработки экспериментальных данных были получены расчетные формулы для оценки пределов погрешности измерений. Установлено, что погрешность растет с увеличением ослабления в измеряемом тракте (пропорционально 3 или 4 степени), причем это ослабление может быть как следствием большой длины линии, так и результатом низкого качества изготовления тракта.

Измерительная система КобальтFX ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СИСТЕМА для измерения S-параметров в расширенном диапазоне до 178 ГГц

Антенные измерения
Балансные измерения
Анализ и фильтрация во временной области
Измерение устройств с переносом частоты
Измерение параметров активных устройств
Измерения на зондовых станциях (on-wafer)



Приглашаем Вас оценить возможности системы КобальтFx
на нашем стенде на выставке форума «Микроэлектроника»
Даты выставки: 24-27 сентября 2024 года
Место проведения: Университет «Сириус»

planarchel.ru
8 800 222 12 11



ЛИТЕРАТУРА

1. **Донченко С.И., Денисенко О.В., Каверин А.М., Пудловский В.Б., Фролов А.А., Бондаренко А.С.** Калибровка имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем по фазе несущей частоты // Измерительная техника. № 1 (73). 2024. С. 40–48.
2. **Бурцев С.Ю., Печерица Д.С.** Оценка задержки сигнала в тракте АЦП измерительного устройства // Альманах современной метрологии. 2022. № 4(32). С. 52–58.
3. **Pecheritsa D., Burtsev S., Frolov A., Fedotov V.** GNSS-receivers carrier phase calibration // Proc. of 2020 1st International Conference Problems of Informatics. Electronics and Radio Engineering. PIERE 2020. 1. 2020. P. 165–169.
4. Keysight Technologies. СПО оценки погрешности измерений векторного анализатора цепей. Электронный ресурс: <https://www.keysight.com/us/en/lib/software-detail/computer-software/downloadable-vector-network-analyzer-uncertainty-calculator-1000000418epsgsud.html> (дата обращения 27.06.2024 г.).
5. Site Master S331P. Ultraportable Cable & Antenna Analyzer. Featuring Classic and Advanced Modes Электронный ресурс: <https://anritsu.nt-rt.ru/images/manuals/k4-1.pdf> (дата обращения 27.06.2024 г.).
6. Описание типа средства измерений. Рефлектометры векторные CABAN R60, CABAN R180. Электронный ресурс: <https://nd-gsi.ru/grsi/710xx/71037-18.pdf> (дата обращения 27.06.2024 г.).
7. Автоматические калибровочные модули. Руководство по эксплуатации. Электронный ресурс: https://planarchel.ru/upload/iblock/2ea/pgoz05245fzbg8eoko8dm6ai0ncns191/operating_manual_planar_acm_ver_14_2020_05_rus.pdf (дата обращения: 27.06.2024 г.).
8. Overview SUCOFLEX 100. Электронный ресурс: <https://rfcomponents.ru/Huber%20Suhner/kabeli-SUCOFLEX-100.pdf> (дата обращения 27.06.24 г.).
9. **Хибель М.** Основы векторного анализа цепей. М.: Изд. МЭИ, 2009.
10. **Дансмор Дж.П.** Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М.: Техносфера. 2018. 736 с.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1600 руб.

НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ

Дансмор Джоэль П.*Пер. с англ. и науч. ред. Е. Ю. Харитоновой, Е. В. Андроновой, А. С. Бондаренко**Издание осуществлено при поддержке компании Keysight Technologies*

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2019. – 736 с.,
ISBN 978-5-94836-505-3

В книге рассмотрен широкий круг измерительных задач в СВЧ-диапазоне. В центре внимания – измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов. Приведены практические примеры измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители и др.

Автор книги – инженер-разработчик с 30-летним стажем – работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне: от компонентов сотового телефона до спутниковых мультимплексоров.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ- / СВЧ-устройств, занимающихся моделированием и тестированием как отдельных узлов радиоэлектронной аппаратуры, так и законченных изделий, к примеру систем спутниковой связи, радиолокации и радионавигации. Крайне полезной данная книга будет и в процессе обучения студентов радиотехнических специальностей.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru



22–24 октября 2024

Москва, МВЦ «Крокус Экспо»

21-я Международная выставка испытательного
и контрольно-измерительного оборудования



Забронируйте стенд
testing-control.ru



Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
control@mvk.ru