

Результаты ключевых сличений эталонов напряженности электрического поля в диапазоне частот 1—18 ГГц

С. А. КОЛОТЫГИН, С. Л. НЕУСТРОЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: lab202@vniiftri.ru

Рассмотрены результаты ключевых сличений эталонов напряженности электрического поля в диапазоне частот 1—18 ГГц, в результате чего подтверждены представленные в базе данных МБМВ калибровочные и измерительные возможности ВНИИФТРИ по напряженности электромагнитного поля на указанных частотах.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, сличение.

The results of key comparison of standards of electric field intensity in the frequency range from 1 to 18 GHz have been considered. As a result of comparisons the data presented in BIPM data base confirmed the calibration and measurement capabilities of VNIIFTRI.

Key words: electric field intensity, key comparison.

В 2008 г. членам рабочей группы по радиочастотным измерениям МБМВ поступило предложение о проведении ключевых сличений эталонов единицы напряженности электромагнитного поля (вольт на метр). Оно было окончательно принято на заседании рабочей группы по радиочастотным измерениям (GT-RF) Консультативного комитета по электричеству и магнетизму (CCEM) в 2010 г. Этим сличениям было присвоено наименование CCEM.RF-K24.F. Роль пилотной лаборатории взяла на себя Национальная физическая лаборатория (NPL, Великобритания). В сличениях приняли участие все национальные метрологические институты (НМИ) — участники соглашения о взаимном признании национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки и измерений (CIPM MRA), у которых заявлены измерительные возможности в базе данных СМС в области напряженности электрического поля и плотности потока энергии электромагнитного поля.

В сличениях участвовали эталоны, представленные следующими 14 лабораториями: Физико-технический федеральный институт (PTB, Германия); Национальная физическая лаборатория (NPL, Великобритания); Национальный институт стандартов и технологий (NIST, США); Национальная лаборатория метрологии и испытаний (LNE, Франция); Чешский метрологический институт (CMI, Чехия); Корейский институт эталонов и науки (KRISS, Корея); Национальный институт метрологических исследований (INRIM, Италия); Федеральное бюро метрологии и аккредитации (METAS, Швейцария); Национальный метрологический институт Австралии (NMIA, Австралия); Национальный институт метрологии (NIM, Китай); Национальный метрологический институт Японии (NMIJ, Япония); Национальный институт эталонов (VSL, Нидерланды); Национальный метрологический институт Совета по научно-техническим исследованиям (TUBITAK-UME, Турция); Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, Россия).

Возимый эталон и методы измерений. В качестве возимых эталонов использовали два измерителя напряженности электромагнитного поля фирмы Amplifier Research: с антенной-преобразователем (зондом) FL7018 на диапазон частот 3 МГц — 18 ГГц с питанием от лазера и диодными детекторами; с антенной-преобразователем (зондом) FL7050 на диапазон частот 300 МГц — 50 ГГц с питанием от батарей и термопарными датчиками (рис. 1). В техническом протоколе было указано, что зонд должен быть ориентирован в пространстве так, чтобы его ось была перпендикулярна вектору $\mathbf{E}$ электрического поля и направлению распространения. На корпусе зондов имеются специальные метки, которые указывают, как установить зонд в правильное положение относительно направления электрического поля.



Рис. 1. Зонды FL7018 и FL7050

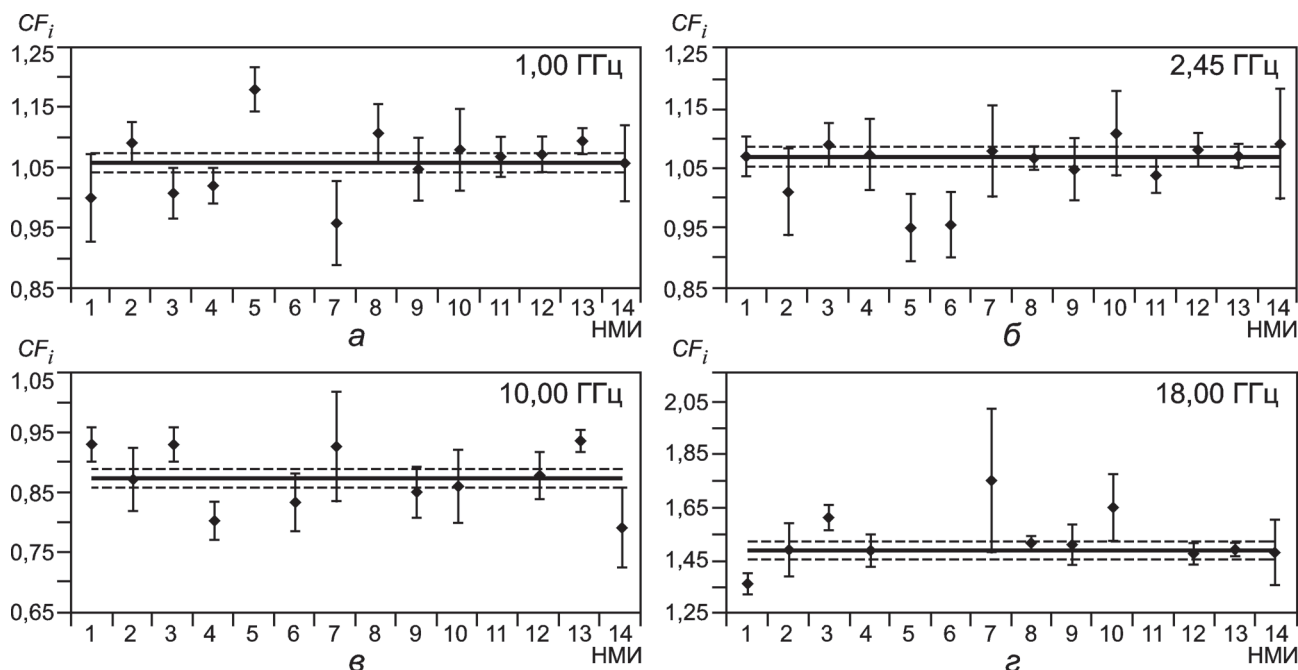


Рис. 2. Поправочные коэффициенты и неопределенности их измерений, полученные для зонда FL7018 при $E = 10$ В/м на разных частотах различными НМИ:

1 — INRIM; 2 — METAS; 3 — CMI; 4 — VSL; 5 — LNE; 6 — NIM; 7 — NISI; 8 — NMIA; 9 — KRIS; 10 — TUBIAK-UME; 11 — NMJ; 12 — ВНИИФТРИ; 13 — NPL; 14 — PTB.

Полужирной линией отмечено опорное значение ключевого сличения KCRV, пунктирными линиями — его доверительные границы

Измерения проводили на частотах 1; 2,45; 10; 18 ГГц с зондами FL7018 на уровнях напряженности электрического поля 10; 30; 100 В/м и FL7050 на уровнях 30; 100 В/м. Измерения проходили с января 2010 г. по июль 2012 г. Эталоны-переносчики периодически возвращали в NPL для оценки дрейфа калибровочных коэффициентов возимых эталонов.

Отчеты лабораторий содержали следующие данные: тип прибора и его серийный номер; частота f , на которой проводили измерения; напряженность поля E , индицируемая прибором; действительное значение напряженности поля; рассчитанное значение поправочного коэффициента $CF_i(E, f)$; неопределенность каждого измерения $u(CF_i(E, f))$; бюджет неопределенности измерений; температура в лаборатории.

От ВНИИФТРИ в сличениях участвовал Государственный первичный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля в диапазоне частот 0,3—178 ГГц (ГЭТ 160—2006). Измерения выполняли в соответствии с утвержденными методиками калибровки средств измерений напряженности электрического поля и плотности потока энергии электромагнитного поля.

Результаты ключевых сличений. Опорное значение ключевого сличения (KCRV) $CF_R(E, f)$ определяли для каждого значения частоты и уровня напряженности поля как не взвешенное среднее результатов измерений участников

$$CF_R(E, f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CF_i(E, f),$$

его расширенную неопределенность вычисляли по формуле

$$u^2(CF_R(E, f)) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N u^2(CF_i(E, f)).$$

В отчете содержатся данные 20 результатов измерений. Для каждого из них рассчитаны опорные значения ключевого сличения KCRV и его расширенная неопределенность. Результаты представлены в виде таблиц и графиков.

Примеры таких графиков для преобразователя FL7018, напряженности электрического поля 10 В/м на частотах 1—18 ГГц приведены на рис. 2. На них представлены результаты измерений поправочного коэффициента и неопределенности измерений при коэффициенте охвата $k = 1$.

Степень эквивалентности национального эталона выражается отклонением от опорного значения ключевого сличения d_i и неопределенностью этого отклонения $u(d_i)$:

$$d_i = CF_i(E, f) - CF_R(E, f);$$

$$u^2(d_i) = u^2(CF_i(E, f)) + u^2(CF_R(E, f)).$$

Для результатов измерений во всех НМИ были рассчитаны степени эквивалентности и расширенные неопределенности по каждому национальному эталону, а также степени эквивалентности между ними (табл. 1—4).

Таблица 1

Значения d_i , $u(d_i)$ для зондов FL7018 и FL7050 при разных напряженностях электрического поля, опорных значениях ключевого сличения (KCRV) эталонов различных НМИ и частоте $f = 1$ ГГц

НМИ	FL7018						FL7050			
	10 В/м (1,06)		30 В/м (1,10)		100 В/м (1,11)		30 В/м (1,09)		100 В/м (1,13)	
	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$
INRIM	-0,06	0,14	-0,06	0,14	—	—	-0,07	0,15	—	—
METAS	0,03	0,07	0,01	0,07	-0,01	0,09	0	0,07	0	0,09
CMI	-0,05	0,08	-0,08	0,08	-0,1	0,09	-0,02	0,08	-0,05	0,08
VSL	-0,04	0,06	-0,04	0,06	—	—	-0,01	0,06	—	—
LNE	0,12	0,08	0,11	0,07	0,14	0,06	0,1	0,08	0,06	0,05
NIM	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NIST	-0,10	0,14	-0,15	0,16	-0,15	0,15	0	0,13	-0,03	0,12
NMIA	0,05	0,09	0,02	0,09	0,01	0,09	0,03	0,09	0,03	0,1
KRISS	-0,01	0,1	-0,02	0,1	-0,05	0,1	-0,01	0,09	-0,03	0,09
TUBITAK	0,02	0,13	0,01	0,13	0,01	0,13	0,09	0,14	0,06	0,13
NMIJ	0,01	0,07	0,01	0,07	0	0,09	0,01	0,06	0	0,09
VNIIFTRI	0,02	0,06	0,04	0,06	0,03	0,06	-0,02	0,06	-0,03	0,06
NPL	0,04	0,05	0,04	0,05	0	0,05	0,02	0,04	-0,01	0,05
PTB	0,00	0,12	-0,03	0,12	—	—	-0,01	0,12	—	—

Таблица 2

То же, что и в табл. 1 при $f = 2,45$ ГГц

НМИ	FL7018						FL7050			
	10 В/м (1,07)		30 В/м (1,10)		100 В/м (1,08)		30 В/м (1,08)		100 В/м (1,11)	
	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$
INRIM	-0,06	0,14	-0,04	0,15	—	—	-0,09	0,15	—	—
METAS	0,02	0,07	0	0,07	0,01	0,09	0,01	0,07	-0,01	0,09
CMI	0	0,12	0,01	0,13	—	—	-0,08	0,11	—	—
VSL	-0,12	0,12	-0,11	0,12	—	—	-0,08	0,11	—	—
LNE	0	0,07	0,04	0,07	0,02	0,05	-0,01	0,07	-0,02	0,06
NIM	-0,11	0,11	-0,05	0,12	-0,05	0,11	0,01	0,11	0	0,11
NIST	0,01	0,15	-0,02	0,15	-0,04	0,15	0,03	0,13	0,02	0,14
NMIA	0	0,05	-0,01	0,05	-0,01	0,05	0	0,06	-0,02	0,06
KRISS	-0,02	0,1	-0,02	0,1	-0,01	0,1	0,07	0,1	0,06	0,1
TUBITAK	0,04	0,13	0,02	0,14	0,03	0,13	0	0,12	-0,02	0,12
NMIJ	-0,03	0,06	-0,02	0,07	—	—	0	0,06	—	—
VNIIFTRI	0,01	0,06	0,02	0,06	0,03	0,06	0,04	0,06	0,03	0,06
NPL	0	0,05	0,01	0,05	0	0,05	0,02	0,05	0	0,05
PTB	0,02	0,17	0,03	0,18	0,02	0,17	-0,03	0,16	-0,04	0,16

Таблица 3

То же, что и в табл. 1 при $f = 10$ ГГц

НМИ	FL7018						FL7050			
	10 В/м (0,87)		30 В/м (0,88)		100 В/м (0,87)		30 В/м (1,08)		100 В/м (1,09)	
	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$
INRIM	0	0,11	0,02	0,11	0,04	0,11	−0,06	0,12	−0,04	0,12
METAS	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,1	0	0,07	−0,01	0,09
CMI	−0,07	0,07	−0,08	0,07	−0,07	0,07	−0,01	0,08	−0,01	0,09
VSL	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LNE	0,06	0,07	0,09	0,07	0,04	0,05	−0,04	0,07	−0,05	0,05
NIM	−0,04	0,1	−0,05	0,1	−0,05	0,1	0,05	0,12	0,07	0,12
NIST	0,05	0,19	0	0,13	0	0,12	0,07	0,14	0,05	0,14
NMIA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
KRISS	0,02	0,09	0	0,09	0,01	0,09	0,04	0,1	0,04	0,1
TUBITAK	−0,01	0,13	0	0,13	0	0,13	0,02	0,13	0,03	0,14
NMIJ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VNIFTRI	0	0,09	0,01	0,09	0	0,08	−0,01	0,05	−0,03	0,05
NPL	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,05	0,03	0,05	0,02	0,05
PTB	−0,08	0,13	−0,08	0,13	−0,09	0,14	−0,08	0,15	−0,08	0,16

Таблица 4

То же, что и в табл. 1 при $f = 18$ ГГц

НМИ	FL7018						FL7050			
	10 В/м (1,49)		30 В/м (1,58)		100 В/м (1,42)		30 В/м (1,09)		100 В/м (1,08)	
	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$	d_i	$u(d_i)$
INRIM	0	0,18	−0,01	0,21	0,01	0,2	−0,06	0,13	−0,04	0,13
METAS	0,12	0,12	0,08	0,11	0,14	0,14	0,02	0,07	0,04	0,09
CMI	0	0,12	−0,09	0,13	−0,06	0,12	0	0,09	0	0,09
VSL	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LNE	−0,13	0,11	−0,13	0,1	−0,14	0,08	−0,07	0,07	−0,06	0,05
NIM	—	—	—	—	—	—	0,06	0,13	0,06	0,13
NIST	0,26	0,55	0,22	0,41	0,27	0,57	0,18	0,18	0,16	0,18
NMIA	0,02	0,09	—	—	—	—	—	—	—	—
KRISS	0,02	0,14	0,01	0,16	0,05	0,15	−0,03	0,09	−0,03	0,1
TUBITAK	0,16	0,26	0,09	0,24	0,14	0,24	0,08	0,15	0,06	0,15
NMIJ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VNIFTRI	−0,01	0,09	−0,1	0,09	−0,09	0,08	0	0,06	−0,02	0,06
NPL	0	0,08	−0,05	0,08	−0,03	0,07	0,02	0,05	0,01	0,05
PTB	−0,01	0,22	−0,05	0,24	−0,03	0,23	−0,03	0,16	−0,03	0,16

Полный текст финального отчета приведен на сайте МБМВ [1].

Заключение. Результаты измерений ключевых сличений CCEM.RF-K24.F, полученные во ВНИИФТРИ, совпали с опорными значениями в пределах заявленных погрешностей и подтвердили заявленные калибровочные и измерительные возможности института в соответствии с данными СМС по

напряженности электрического поля в диапазоне частот 1—18 ГГц, опубликованными на сайте МБМВ.

Л и т е р а т у р а

1. **Официальный** сайт МБМВ. http://www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/EM/RF-K24/CCEM.RF-K24.F.pdf.

Дата принятия 01.11.2014 г.