

МЕТОДИКА ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ОШИБОК АНТЕННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

М. В. Снастин

Представлен алгоритм динамической корректировки ошибок антенного измерительного стенда, позволяющий учесть влияние измерительного тракта на результаты измерения. Рассматриваемая методика позволяет расширить аппарат традиционной штатной калибровки средства измерения применительно к стендам, где измерительные кабели претерпевают воспроизводимое механическое воздействие – перемещение в пространстве, изгибы, скрутки. Соответствующие поправки в результаты измерений определяются и вносятся на этапе постобработки. Применение такого подхода позволяет повысить точность результатов антенных испытаний. Описываются основные этапы процесса относительно SOLT калибровки.

Ключевые слова: безэховая экранированная камера, векторный анализатор цепей, антенные измерения, калибровка измерительного тракта, корректировка ошибок измерения, SOLT калибровка.

1. Введение

Современные радиотехнические системы, имеющие в своем составе антенны и антенные решетки, требуют повышенной точности проведения испытаний. Обеспечение проведения высокоточных измерений параметров антенной техники позволяет повышать эффективность разработки радиотехнических устройств и осуществлять верификацию характеристик готовых изделий.

Антенные измерения проводятся в ближней, промежуточной или дальней зоне на специализированных стендах различных полигонов – безэховых камерах, полигонах открытого типа или иных видах испытательных установок. При этом представляют интерес не только сами измеренные данные, но и вопросы, связанные с оценкой погрешности их измерения, а также воспроизводимостью полученных результатов. Как правило, проводимые измерения не статичны; в процессе измерений зачастую требуется обеспечивать относительное перемещение измерительной и исследуемой антенн. Калибровка средства измерения предполагает повторяемость измерений. Измерительные кабели должны быть неподвижны, а их положение – максимально приближено к случаю основных измерений. Проблема влияния кабелей на измерения на динамических стендах (моторизированных, роботизированных) широко известна [1]. Наиболее часто в публикациях встречаются методы измерения с помощью трех кабелей [2], сравнение сигнала на опорном канале [3] или калибровка коэффициента отражения по известной мере [4]. В подавляющем же большинстве случаев данной проблеме не уделяется должного внимания и допускается, что влиянием измерительных кабелей можно пренебречь [5]. В настоящей работе рассмотрена корректировка динамических ошибок при работе с векторными анализаторами цепей.

2. Теория

В последние десятилетия при анализе сверхвысококачественных (СВЧ) устройств в измерительной технике получили широкое распространение измерители элементов матрицы рассеяния – анализаторы цепей. На сегодняшний день известен ряд различных калибровок векторных анализаторов цепей (ВАЦ) и множество их вариаций [6 – 9]. Калибровка ВАЦ призвана минимизировать систематическую составляющую неопределенности измерения. В общем случае рассматриваемый алгоритм внесения поправок в результаты измерения применим к любому семейству калибровок; далее будут описаны основные этапы процесса относительно семейства SOLT калибровок (по названию калибровочных мер: Short, Open, Load, Thru).

1P калибровка. При необходимости измерения коэффициента отражения, в соответствии с трехпараметрической моделью однопортового (1P) ВАЦ, получаемой из 12-параметрической модели двухпортового (2P) ВАЦ¹ путем упрощения, необходимо провести измерение отражения от трех мер – холостого хода (XX), короткого замыкания (КЗ) и согласованной нагрузки (СН). В результате решения системы линейных уравнений определяются факторы ошибки ВАЦ: направленность \dot{E}_D , согласование источника сигнала \dot{E}_S и трекинг отражения \dot{E}_R (потери в тракте отраженного сигнала). Откуда скорректированный коэффициент отражения от исследуемой нагрузки [10]:

$$\dot{\Gamma}_{\text{ист}} = \frac{\dot{\Gamma}_{\text{изм}} - \dot{E}_D}{\dot{\Gamma}_{\text{изм}} \dot{E}_S - \dot{E}_D \dot{E}_S + \dot{E}_R}, \quad (1)$$

где $\dot{\Gamma}$ – коэффициент отражения меры, причем индекс «изм» указывает на измеренное значение, а «ист» – на истинное; \dot{E} – факторы ошибок ВАЦ.

¹Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA)// EURAMET CG. Version 3.0. – 2018. – No. 12. – 133 p.

При переходе от классической 1Р калибровки к динамической не требуется дополнительного измерительного оборудования. Каждый фактор ошибок предполагает уже не только зависимость от частоты, но и от пространственных координат отдельных узлов измерительного стенда – измерительной и исследуемой антенн. Иначе говоря, динамическая калибровка позволяет определять параметры модели ошибок и вносить уникальную корректировку в измеренные данные в зависимости от положения измерительных антенн в пространстве. Так как предлагаемая методика подразумевает постобработку, то связанные с ней измерения можно проводить как до, так и после основных измерений исследуемого устройства (ИУ). При том измерение отражения от калибровочных мер проходит аналогично измерению отражения от ИУ, т. е. процесс измерений повторяется для имеющихся мер ХХ, КЗ и СН, последовательно подключаемых к измерительному кабелю вместо ИУ.

Динамическая калибровка может применяться, например, при антенных измерениях в поле дальней зоны совместно с нормализацией коэффициента передачи относительно эталонной антенны. Калибровка предполагает принятие мер к обеспечению повторяемости условий проведения измерений.

2Р калибровка. Модель 2Р ВАЦ содержит 12 факторов ошибок. Помимо уже названных для случая 1Р, в модели добавляются следующие параметры: согласование нагрузки \dot{E}_L , трекинг передачи \dot{E}_T и развязка \dot{E}_X . В силу симметрии модели ВАЦ полученные шесть факторов описывают модель ошибок в одном из направлений зондирования (прямом). Аналогичные им шесть параметров описывают модель ошибок в другом направлении зондирования (обратном). Классическая 2Р калибровка осуществляется в три этапа: а) 1Р калибровка портов; б) измерение двух портов на проход через адаптер-перемычку; в) опциональное измерение развязки между портами \dot{E}_X , – в противном случае считают $\dot{E}_X = 0$.

В предлагаемой методике динамической 2Р калибровки в качестве адаптера-перемычки предполагается применение фазостабильного (ФС) измерительного кабеля. Так как измерительный кабель в процессе измерений подвергается механическому воздействию, то и на перемычку также будет оказываться аналогичное воздействие. Допускается применение сборки измерительных СВЧ-кабелей при условии, что подвергаться механическому воздействию будет фазостабильный кабель, как показано на рис. 1, а. Предлагаемый сборный адаптер-

перемычка состоит из одного или двух таких кабелей на концах и типового измерительного СВЧ-кабеля для обеспечения требуемого расстояния между портами. Коэффициенты матрицы рассеяния такой перемычки должны быть известны, т. е. измерены отдельно. Описываемый подход аналогичен калибровке с известным адаптером² (Defined Thru), однако отличается тем, что калибруемый тракт не статичен в процессе измерения. Обобщенная схема антенного измерительного стенда представлена на рис. 1, б, где линия из точек указывает на возможность изменения пространственных координат антенн в пространстве, а пунктирной линией обозначена плоскость калибровки.

Подобно классической 2Р калибровке, на первом шаге проводится последовательное измерение мер отражения в плоскости калибровки – месте подключения измерительной антенны и ИУ. На втором шаге измеряется сборная адаптер-перемычка на проход. Далее опционально измеряется развязка между портами для определения параметра \dot{E}_X .

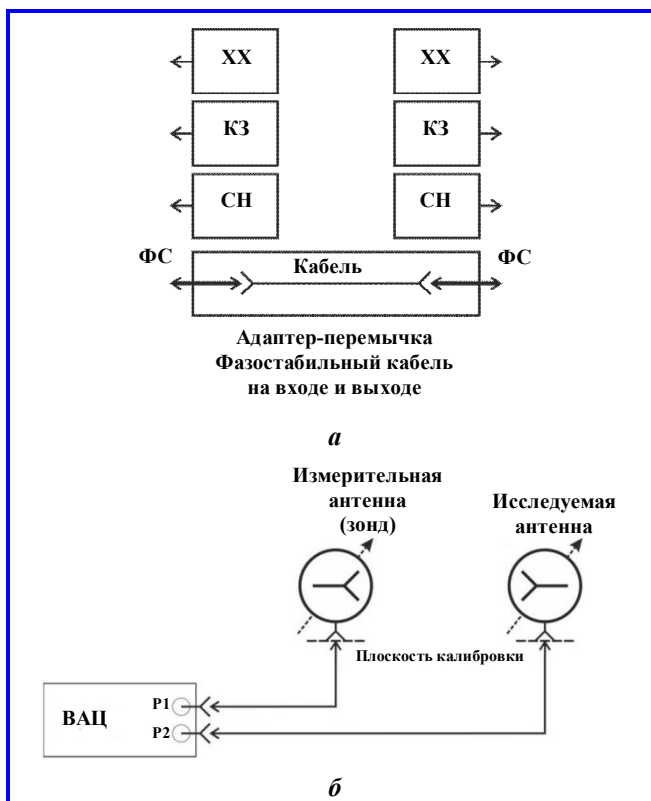


Рис. 1. К описанию динамической калибровки: а – калибровочные меры для полной 2Р калибровки с известным адаптером; б – обобщенная схема измерительного стенда

²Specifying Calibration Standards and Kits for Agilent vector Network Analyzers. AN 1287-11. – USA : Agilent Tech, 2009 – 41 p.

3. Экспериментальные исследования

Предлагаемая методика была верифицирована экспериментальным способом при проведении антенных измерений в поле дальней зоны на стенде, изображенном на рис. 2, включающий в себя опорно-поворотное устройство (ОПУ), стойку с измерительной антенной и ВАЦ с комплектом СВЧ-кабелей. В качестве ИУ была выбрана рупорная антенна из состава измерительного комплекса. На рис. 3 показаны зависимости измеренных модуля $\dot{\Gamma}_{in}$ (а) и фазы ϕ_{in} (б) коэффициента отражения от ИУ. Серая кривая (Raw) соответствует измерению до внесения корректировки, а красная (Cal) – после. Стабильность параметра после корректировки указывает на повторяемость проведения измерений. Измеренный с помощью предлагаемой методики комплексный коэффициент отражения находится в хорошем соответствии с паспортными данными на антенну.

На рис. 4 представлен пример экспериментальной оценки вклада измерительного кабеля при проведении измерений на стенде дальней зоны в зависимости от вращения поворотного стола. В исследуемой полосе частот (0,8 – 6,0) ГГц скомпенсированная ошибка в коэффициенте передачи в среднем составила 0,26 дБ и в пределе достигла значения 0,58 дБ.

На рис. 4 сиреневая и синяя кривые соответствуют основной и кросс-поляризационной составляющей диаграммы направленности (ДН) ИУ. Красная кривая соответствует полной диаграмме направленности. Черная кривая – скорректированной характеристике направленности после применения динамической калибровки. Темно-зеленая линия соответствует разнице между полученными кривыми до корректировки и после.

4. Заключение

Предложена методика корректировки ошибок измерительного стенда, позволяющая учесть изменение характеристик измерительного тракта при систематическом механическом воздействии на него. Процедура не требует дополнительного измерительного оборудования или оснастки кроме фазостабильных кабелей и набора калибровочных мер. Представленная методика также может рассматриваться как инструмент для диагностики штатного измерительного тракта.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: проект № FSFF-2020-0015.

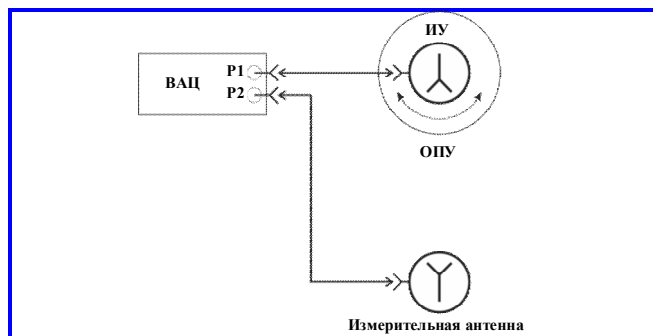


Рис. 2. Типовой стенд измерения в дальней зоне

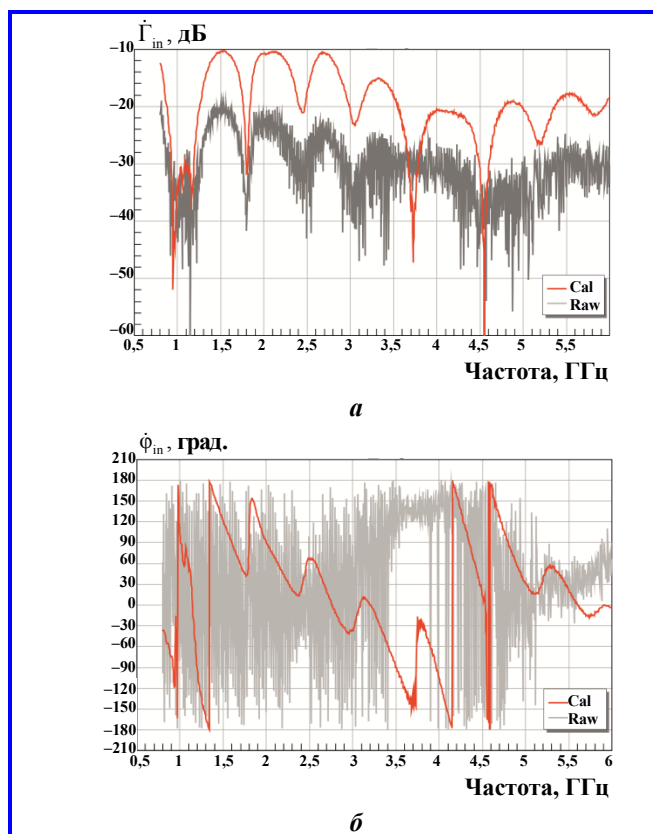


Рис. 3. Измеренный коэффициент отражения от исследуемого устройства: а – модуль; б – фаза

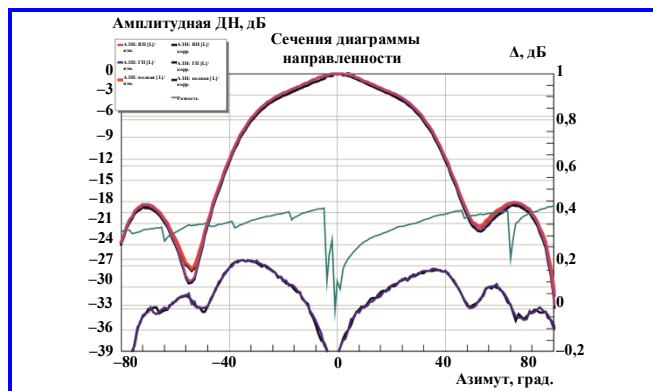


Рис. 4. Пример оценки ошибки в коэффициенте передачи для стенда измерений в дальней зоне на частоте 3,75 ГГц

Литература

1. IEEE Std 1720-2012. IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements. – 2012. – P. 1 – 102.
2. Results of a new RF cable correction method / S. McBride, D. Musser // 28th Annual Meeting and Symposium of the Antenna Measurements Technique Association. – 2006. – P. 1 – 5.
3. Millimeter Wave Near-Field Antenna Testing / D. J. Rensburg // Microwave Product Digest (MPD). – 2010. – P. 1 – 6.
4. 60 GHz Antenna Measurement Setup using a VNA without External Frequency Conversion / P. I. Popa, S. Pivnenko, J. M. Nielsen [et al.] // 36th Annual Symposium of the Antenna Measurement Technique Association. – 2014. – P. 1 – 6.
5. Accuracy evaluation for antenna measurements at mm-wave frequencies / L. Böhm, F. Bögelsack, M. Hitzler [et al.] // 10th European Conference on Antennas and Propag. (EuCAP), 2016. – P. 1 – 5.
6. Incomplete 2-port vector network analyzer calibration methods / A. Henze, N. Tempone, G. Monasterios [et al.] // IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). – Bariloche, Argentina, June 11 – 13, 2014. – P. 810 – 815.
7. A review of VNA calibration methods / A. Rumiantsev // 38th European Microwave Conference. Workshop WMO-3. – Amsterdam, Netherlands, Oct. 28 – 30, 2008. – URL : [http://ael.cbnu.ac.kr/lectures/graduate/microwave-cad-and-measurements/lecture-notes/L05-TRL-calibration/ref-4-rumiantsev\(08-pt\)-VNA%20calib%20methods,%20review.pdf](http://ael.cbnu.ac.kr/lectures/graduate/microwave-cad-and-measurements/lecture-notes/L05-TRL-calibration/ref-4-rumiantsev(08-pt)-VNA%20calib%20methods,%20review.pdf).
8. A Novel Calibration Algorithm for a Special Class of Multiport Vector Network Analyzers / A. Ferrero, V. Teppati, M. Garelli [et al.] // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 2008. – Vol. 56. – No. 3. – P. 693 – 699.
9. Классификация и анализ методов калибровки / В. Г. Губа, А. А. Ладур, А. А. Савин // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24). – Часть 1. – С. 149 – 155.
10. VNA calibration / A. Rumiantsev, N. Ridler // IEEE Microwave Magazine. – 2008. – Vol. 9. – No. 3. – P. 86 – 99.

Поступила в редакцию 03.02.2022

*Михаил Владимирович Снастин, ведущий инженер, аспирант,
т. 8 (916) 814-79-42, e-mail: Mexanizmys@ya.ru.
(Московский авиационный институт (МАИ (НИИ)).*

PROCEDURE OF DYNAMIC ERROR CORRECTION OF ANTENNA MEASUREMENT BENCH

M. V. Snastin

An algorithm for dynamic error correction of the antenna measuring bench is presented, which makes it possible to take into account the influence of the measuring path on the measurement results. The procedure makes it possible to expand the equipment of traditional standard calibration of the measuring instrument in relation to benches where the measuring cables are subject to reproducible mechanical effect : movement in space, bends, twists. Appropriate corrections to the measurement results are determined and made at the post-processing stage. The use of this approach makes it possible to improve the accuracy of antenna test results. The main process steps regarding SOLT calibration are described.

Keyword: anechoic screened chamber, vector network analyzer, antenna measurements, measuring path calibration, measurement error correction, SOLT calibration.

References

1. IEEE Std 1720-2012. IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements. – 2012. – P. 1 – 102.
2. Results of a new RF cable correction method / S. McBride, D. Musser // 28th Annual Meeting and Symposium of the Antenna Measurements Technique Association. – 2006. – P. 1 – 5.
3. Millimeter Wave Near-Field Antenna Testing / D. J. Rensburg // Microwave Product Digest (MPD). – 2010. – P. 1 – 6.
4. 60 GHz Antenna Measurement Setup using a VNA without External Frequency Conversion / P. I. Popa, S. Pivnenko, J. M. Nielsen [et al.] // 36th Annual Symposium of the Antenna Measurement Technique Association. – 2014. – P. 1 – 6.
5. Accuracy evaluation for antenna measurements at mm-wave frequencies / L. Böhm, F. Bögelsack, M. Hitzler [et al.] // 10th European Conference on Antennas and Propag. (EuCAP), 2016. – P. 1 – 5.
6. Incomplete 2-port vector network analyzer calibration methods / A. Henze, N. Tempone, G. Monasterios [et al.] // IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). – Bariloche, Argentina, June 11 – 13, 2014. – P. 810 – 815.
7. A review of VNA calibration methods / A. Rumiantsev // 38th European Microwave Conference. Workshop WMO-3. – Amsterdam, Netherlands, Oct. 28 – 30, 2008. – URL : [http://ael.cbnu.ac.kr/lectures/graduate/microwave-cad-and-measurements/lecture-notes/L05-TRL-calibration/ref-4-rumiantsev\(08-pt\)-VNA%20calib%20methods,%20review.pdf](http://ael.cbnu.ac.kr/lectures/graduate/microwave-cad-and-measurements/lecture-notes/L05-TRL-calibration/ref-4-rumiantsev(08-pt)-VNA%20calib%20methods,%20review.pdf).
8. A Novel Calibration Algorithm for a Special Class of Multiport Vector Network Analyzers / A. Ferrero, V. Teppati, M. Garelli [et al.] // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 2008. – Vol. 56. – No. 3. – P. 693 – 699.
9. Classification and analysis of calibration methods / V. G. Guba, A. A. Ladur, A. A. Savin // Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. – 2011. – No. 2 (24). – Part 1. – P. 149 – 155.
10. VNA calibration / A. Rumiantsev, N. Ridler // IEEE Microwave Magazine. – 2008. – Vol. 9. – No. 3. – P. 86 – 99.

*Mikhail Vladimirovich Snastin, Leading engineer, Associate Professor,
tel.: +7 (916) 814-79-42, e-mail: Mexanizmys@ya.ru.
(Moscow Aviation Institute (MAI (NRU)).*