CISPR 16-1-6

Edition 1.2 2022-03
CONSOLIDATED VERSION

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

colour inside

INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE
COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES

BASIC EMC PUBLICATION
PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM

Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – EMC antenna calibration

Spécification des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-6: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Étalonnage des antennes CEM

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.100.10; 33.100.20

ISBN 978-2-8322-1087-4

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission
Marque déposée de la Commission Electrotechnique Internationale

CISPR 16-1-6

Edition 1.2 2022-03
CONSOLIDATED VERSION

REDLINE VERSION

VERSION REDLINE

colour inside

INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE
COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES

BASIC EMC PUBLICATION
PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM

Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – EMC antenna calibration

Spécification des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-6: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Étalonnage des antennes CEM



CISPR 16-1-6:2014-12+AMD1:2017-01+AMD2:2022-03 CSV(en-fr)

CONTENTS

FOREWORD 11
1 Scope 13
2 Normative references 13
3 Terms, definitions and abbreviations 14
3.1 Terms and definitions 14
3.1.1 Antenna terms 14
3.1.2 Antenna factor terms 17
3.1.3 Measurement site terms 18
3.1.4 Other terms 19
3.2 Abbreviations 20
4 Fundamental concepts 21
4.1 General 21
4.2 The concept of antenna factor 21
4.3 Calibration methods for 30 MHz and above 22
4.3.1 General 22
4.3.2 Antenna minimum separation distances 22
4.3.3 General considerations for the TAM 22
4.3.4 General considerations for the SSM 22
4.3.5 General considerations for the SAM 23
4.4 Measurement uncertainties for antenna calibration measurement results 23
4.5 Summary of methods of measurement to obtain AF 24
5 Calibration methods for the frequency range 9 kHz to 30 MHz 26
5.1 Calibration of monopole antennas 26
5.1.1 General 26
5.1.2 Calibration by the ECSM 27
5.2 Calibration of loop antennas 33
5.2.1 General 33
5.2.2 TEM (Crawford) cell method 34
5.2.3 Three antenna method (TAM) 37
5.2.4 Current probe method (CPM) 47
5.2.5 Standard antenna method 50
6 Frequencies, equipment and functional checks for calibrations at or above 30 MHz 52
6.1 Calibration frequencies 52
6.1.1 Calibration frequency ranges and increments 52
6.1.2 Transition frequency for hybrid antennas 53
6.2 Measurement instrumentation requirements for antenna calibrations 53
6.2.1 Equipment types 53
6.2.2 Mismatch 55
6.2.3 Dynamic range and reproducibility of SIL measurement 56
6.2.4 Signal-to-noise ratio 57
6.2.5 Antenna masts and cables 57
6.3 Functional checks of an AUC 58
6.3.1 General 58
6.3.2 Balance of an antenna 58
6.3.3 Cross-polar performance of an antenna 58
6.3.4 Radiation patterns of an antenna 59

7 Basic parameters and equations common to antenna calibration methods for frequencies above 30 MHz 59
7.1 Summary of methods for measurements to obtain AF 59
7.2 Site insertion loss measurements 60
7.2.1 General 60
7.2.2 SIL and SA measurement procedure 60
7.2.3 Common uncertainty components of a SIL measurement 61
7.3 Basic equations for the calculation of AF from SIL and SA measurements 63
7.3.1 Antenna factor from SIL measurements 63
7.3.2 Relationship of AF and SIL for a free-space calibration site 63
7.3.3 Relationship of AF and SIL for a calibration site with a metal ground plane 63
7.4 Equations for AF and measurement uncertainties using the TAM, SSM, and SAM 65
7.4.1 TAM 65
7.4.2 SSM 70
7.4.3 SAM 72
7.5 Parameters for specifying antenna phase centre and position 74
7.5.1 General 74
7.5.2 Reference position and phase centres of LPDA and hybrid antennas 75
7.5.3 Phase centres of horn antennas 78
8 Details for TAM, SAM, and SSM calibration methods for frequencies of 30 MHz and above 80
8.1 General 80
8.2 Considerations for F_a calibrations using TAM 80
8.2.1 General considerations 80
8.2.2 Calibration site and antenna set-up considerations for use with the TAM 80
8.2.3 Antenna parameters for a free-space environment or a ground-plane site 82
8.2.4 Validation of calibration method 83
8.3 Considerations for F_a calibrations using the SAM 83
8.3.1 General considerations and calibration site for use of the SAM 83
8.3.2 Calibration procedures and antenna set-ups for F_a by the SAM 84
8.3.3 Parameters of the STA 84
8.4 SSM calibrations at a ground-plane site, 30 MHz to 1 GHz 85
8.4.1 General considerations and calibration site for SSM 85
8.4.2 Calibration procedure for SSM 86
8.4.3 Calculation of F_a 86
8.4.4 Uncertainties of F_a obtained using SSM 87
9 Calibration procedures for specific antenna types for frequencies of 30 MHz and above 88
9.1 General 88
9.2 Calibrations for biconical and hybrid antennas in a free-space environment for 30 MHz to 300 MHz, and tuned dipoles for 60 MHz to 1 000 MHz 88
9.2.1 General considerations and calibration site requirements 88
9.2.2 Calibration procedure and antenna set-up for use with the SAM 88
9.2.3 Uncertainties of F_a determined by the SAM 89
9.2.4 Antenna set-up for use with the TAM (alternative) 91
9.3 Calibration of biconical (30 MHz to 300 MHz) and hybrid antennas, using the SAM and VP at a ground-plane site 91

9.3.1 General considerations and calibration site requirements 91
9.3.2 Calibration procedure and antenna set-up 92
9.3.3 Uncertainties of F_a determined with the SAM 93
9.4 Calibration of LPDA, hybrid, and horn antennas in a free-space environment, 200 MHz to 18 GHz 94
9.4.1 General considerations and calibration site for a free-space environment 94
9.4.2 Calibrations using the TAM 96
9.4.3 Antenna set-up for use with the SAM 97
9.4.4 Alternative antenna set-up for site with absorber on the ground 97
9.5 Calibration of horn and LPDA antennas in a FAR, 1 GHz to 18 GHz 98
9.5.1 Calibration using the TAM 98
9.5.2 Calibration and antenna set-up for the SAM 102
Annex A (informative) Background information and rationale for the methods of antenna calibration 103
A.1 Rationale for the need for several calibration methods and for use of a ground-plane site 103
A.2 Special measures for calibration of omnidirectional antennas 104
A.2.1 General 104
A.2.2 Difficulties with calibration of omnidirectional antennas 105
A.2.3 Minimizing reflections from antenna supports and radiation from cables 105
A.2.4 Field taper and monocone set-up for VP biconical calibration 106
A.2.5 Use of HP or VP in a FAR 107
A.2.6 Substitution where the STA is the same model as the AUC 107
A.3 Calibrations using broadband calculable dipole antennas 107
A.3.1 Disadvantages of tuned dipole antennas 107
A.3.2 Advantages of broadband calculable dipole antennas 108
A.3.3 Disadvantages of calculable dipole antennas 108
A.4 Rationale for F_a and biconical/LPDA antenna cross-over frequency 108
A.4.1 Rationale for F_a 108
A.4.2 Cross-over frequency from biconical to LPDA antennas 109
A.4.3 Biconical element designs 109
A.5 Sources of increased uncertainty in measurement of F_a by the SSM 110
A.6 Calibration of LPDA antennas using smaller separation distances 112
A.6.1 Calibration of LPDA antennas using smaller separation distances 112
A.6.2 Correction of electric field strength to account for phase centre of LPDA antennas 113
A.7 Cross-polar discrimination of LPDA antennas 114
A.8 Tips for measurement instrumentation 115
A.8.1 Signal-to-noise ratio 115
A.8.2 Connector pin depth 117
A.8.3 Effect of added adaptor in a “cable-through” measurement 117
A.8.4 Compression level 118
A.8.5 Source power slope function above 6 GHz 118
A.8.6 Frequency increment for detection of resonances 118
A.8.7 Return loss or VSWR 118
A.9 Uncertainty considerations 119
A.9.1 General 119
A.9.2 Achievable uncertainties for F_a 119
A.9.3 Uncertainties of dipoles above a ground plane 119

A.9.4 Verification of uncertainty by comparison of methods 120
Annex B (normative) Calibration of biconical antennas and tuned dipole antennas above a ground plane using the TAM and the SAM 121
B.1 General 121
B.2 Characteristics of biconical antennas and dipole antennas 121
B.3 Frequencies 121
B.4 Measurement of $F_a(h,p)$ of biconical and tuned dipole antennas and derivation of F_a by averaging $F_a(h,p)$, 30 MHz to 300 MHz 122
B.4.1 General 122
B.4.2 Measurement of $F_a(h,H)$ by the SAM and derivation of F_a 122
B.4.3 Measurement of $F_a(h,H)$ by the TAM and derivation of F_a 125
B.5 Measurement of F_a of tuned dipoles placed high above a ground plane in the frequency range 30 MHz to 1 000 MHz 127
B.5.1 General 127
B.5.2 Measurement of F_a by the SAM 127
B.5.3 Measurement of F_a by the TAM 129
Annex C (informative) Rationale for the equations used in antenna calibration and relevant information about antenna characteristics for uncertainty analysis in the frequency range 30 MHz to 1 GHz 131
C.1 General 131
C.2 Antenna factor and antenna gain 131
C.2.1 Relationship between AF and gain for antennas in a free-space environment 131
C.2.2 Relationship between AF and gain for monopole antennas on a large ground plane 133
C.3 Equations for the insertion loss between antennas 133
C.3.1 Site insertion loss measured at a free-space calibration site 133
C.3.2 Site insertion loss measured at a metal ground-plane site 135
C.3.3 Site attenuation measured at a metal ground-plane site 137
C.4 Uncertainty contribution caused by near-field effects 138
C.5 Uncertainty contribution due to the antenna proximity coupling 139
C.6 Uncertainty contribution due to the ground plane reflection 141
C.6.1 Coupling to image in ground plane 141
C.6.2 Correction factors $\Delta F_{a,SSM}$ for F_a of biconical antenna 146
C.7 Uncertainty contribution due to the antenna radiation pattern 147
C.7.1 General 147
C.7.2 Biconical antennas 148
C.7.3 LPDA antennas 148
C.7.4 Hybrid antennas 149
C.7.5 Horn and LPDA antennas from 1 GHz to 18 GHz 150
Annex D (informative) Background information and rationale for calibration of antennas at frequencies above 1 GHz 153
D.1 Mismatch uncertainty 153
D.2 Mutual coupling between antennas and chamber reflection 153
D.3 Antenna separation distance and phase centre 153
D.4 Example gain of DRH at 1 m distance 155
Annex E (informative) Notes for measurement uncertainty budgets 157
E.1 General 157
E.2 Notes for measurement uncertainty budgets 157

Annex F (informative) Mismatch uncertainties from a two-port device connected between a transmit port and a receive port 167
Annex G (informative) Verification method for calibration of monopole antennas and uncertainty analysis of the ECSM 169
G.1 Verification method for calibration of monopole antennas by the plane wave method from 5 MHz to 30 MHz 169
G.1.1 Calibration procedure 169
G.1.2 Uncertainty evaluation for the calibration of monopole antennas by the plane wave method 170
G.2 Uncertainty analysis of the ECSM 170
G.2.1 Effect of rod length longer than $\lambda/8$ 170
G.2.2 Effect on AF of monopole antenna mounted on a tripod 172
G.2.3 Monopole antenna receiving an electric field 173
G.2.4 Equivalent capacitance substitution method (ECSM) 173
G.2.5 Uncertainties associated with the ECSM 175
G.2.6 An alternative to the dummy antenna, for which $F_{ac} = V_D - V_L$ 177
Annex H (informative) Helmholtz coil method for calibration of loop antennas up to 150 kHz 178
H.1 Measurement procedure 178
H.2 Uncertainties 180
Annex I (normative) Antenna pattern measurement method in the frequency range above 1 GHz, with measurement uncertainty budget 182
I.1 General 182
I.2 Test set-up 182
I.3 Test method 184
I.4 Test report 187
I.5 Uncertainty budget 187
Annex J (informative) Monte Carlo simulation of TAM loop antenna calibration measurement uncertainty – Example source code 189
Bibliography 192

Figure 1 – Set-up for AF determination using a network analyzer 30
Figure 2 – Set-up for AF determination using a measuring receiver and signal generator 30
Figure 3 – Example of mounting a capacitor in the dummy antenna 31
Figure 4 – Block diagram of TEM cell set-up for passive loop antennas 35
Figure 5 – Block diagram of TEM cell set-up for active loop antennas 36
Figure 21 – Loop antenna pair arrangements for the TAM 41
Figure 22 – Accuracy of Greene's formula and integral formula vs. frequency for r_i = 0,05 m, r_j = 0,3 m, and d = 0,39 m 42
Figure 23 – Examples of influence of ground plane on SIL in free-space condition 43
Figure 24 – Definitions of the parameters used in measurement uncertainty evaluation for $K(i,j)$ 45
Figure 25 – Antenna arrangement for the current probe method (CPM) 47
Figure 26 – Antenna arrangement for the standard antenna method 51
Figure 6 – Example of resonant spike due to poor biconical element connections, using 2 MHz increment 53
Figure 7 – Antenna set-up for SIL measurement at a free-space calibration site 61

Figure 8 – Antenna set-up for SIL and SA measurement at a ground-plane calibration site 61
Figure 9 – Antenna set-up for the TAM at a free-space calibration site 66
Figure 10 – Antenna set-up for the TAM at a calibration site with a metal ground plane 69
Figure 11 – Antenna set-up for the SSM 71
Figure 12 – Antenna set-up for the SAM at a calibration site with a metal ground plane 73
Figure 13 – Separation distance relative to the phase centre of an LPDA antenna 76
Figure 14 – LPDA antenna with a tapered curved geometry 78
Figure 15 – Separation distance with respect to the phase centre of horn antennas (see [49] for details) 79
Figure 16 – Schematic of a DRH showing relative locations of field point and phase centre of the DRH 80
Figure 17 – Biconical antenna set-up for SAM using vertical polarization, showing the paired monocone antenna and an example collapsible-element biconical AUC 93
Figure 18 – Test set-up for the calibration of LPDA and hybrid antennas positioned at a large height 96
Figure 19 – Set-up for LPDA antennas above absorber 98
Figure 20 – Set-up for transmission measurements using a network analyzer 100
Figure A.1 – Illustration of the angles of the electromagnetic rays subtended from the scanned LPDA antenna to the fixed height LPDA antenna and to the ground plane 111
Figure A.2 – F_a of biconical antenna with 200 Ω balun measured by the VP method of 9.3, and by the SSM method of 8.4 without correction 112
Figure A.3 – F_a of biconical antenna with 200 Ω balun measured by the VP method of 9.3, and by the SSM method of 8.4 with correction 112
Figure A.4 – Separation distance relative to the phase centre of an LPDA antenna 114
Figure A.5 – Statistical properties of multiple S_{21} sweeps (minimum, maximum, and mean value) 116
Figure A.6 – Standard deviation of S_{21} 116
Figure A.7 – Normalized standard deviation of S_{21} 117
Figure C.1 – Simplified model of a receive antenna 132
Figure C.2 – Insertion loss measurement for antenna calibration at a free-space calibration site 134
Figure C.3 – Insertion loss measurement for antenna calibration at a calibration site with a metal ground plane 136
Figure C.4 – Comparison of field strength given by Equation (C.17) versus in near-field region given by Equation (C.31) 139
Figure C.5 – Theoretical calculations of proximity coupling effects on the AF from the TAM (free-space conditions) 141
Figure C.6 – Deviation of AF from free-space value, F_a, caused by mutual coupling to the image in a metal ground plane (theoretical results) 143
Figure C.7 – Variation of $F_a(h,\mathrm{H})$ of biconical antenna with 50 Ω balun, 30 MHz to 320 MHz at heights every 0,5 m above a ground plane from 1 m to 4 m 144
Figure C.8 – AF of Figure C.7 normalized to free-space AF 144
Figure C.9 – Variation of $F_a(h,\mathrm{H})$ of biconical antenna with 200 Ω balun, 30 MHz to 320 MHz at heights every 0,5 m above a ground plane from 1 m to 4 m 145
Figure C.10 – Diagram of one triangular section of a biconical antenna element 147
Figure C.11 – Examples of radiation patterns (relative realized gain) of two example biconical antennas compared to ideal half-wave tuned dipole antenna 148

Figure C.12 – Examples of radiation patterns (relative realized gain) of three example LPDA antennas, compared to ideal half-wave tuned dipole antenna 149
Figure C.13 – Examples of radiation patterns (relative realized gain) of an example hybrid antenna, compared to ideal half-wave tuned dipole antenna 150
Figure C.14 – Example radiation patterns for classical DRH antenna 151
Figure C.15 – Example radiation patterns for novel DRH antenna 151
Figure C.16 – Example radiation patterns for classical LPDA antenna 152
Figure C.17 – Example radiation patterns for V-type LPDA antenna 152
Figure D.1 – Relative phase centres of a DRH antenna and an LPDA antenna 154
Figure D.2 – A transmission system between a horn antenna and an LPDA antenna 155
Figure D.3 – Measured AFs of a DRH antenna at 4,5 GHz 155
Figure D.4 – Graph showing the realized gain at 1 m for a DRH antenna 156
Figure E.1 – Comparison of measured and predicted SIL for calculable dipole antenna – 60 MHz element 160
Figure E.2 – Comparison of measured and predicted SIL for calculable dipole antenna – 180 MHz element 161
Figure E.3 – Reflectivity of chamber absorbing materials 165
Figure E.4 – Laser alignment system 165
Figure F.1 – Flow graph representation of a two-port device between a transmit port and a receiver port 167
Figure F.2 – Signal flow reduction 167
Figure G.1 – Diagram showing how the brass rod connects to the type N male bulkhead connector 170
Figure G.2 – Graph of the magnitude of the tan(…) ratio term in Equation (4) of 5.1.2.2 171
Figure G.3 – Graphical presentation of Equation (4) of 5.1.2.2 self-capacitance C_a of a 1 m monopole 171
Figure G.4 – Graphical presentation of Equation (5) of 5.1.2.2 height correction factor L_h 172
Figure G.5 – Calibration set-up consisting of a biconical and a loop antenna, and an elevated monopole antenna with vertical feed wires 173
Figure G.6 – Equivalent circuit representation for a monopole antenna system 173
Figure G.7 – Monopole antenna calibration using the ECSM 174
Figure G.8 – Equivalent circuit representation for the ECSM 174
Figure G.9 – Simplified circuit representation for Figure G.8 175
Figure G.10 – Circuit for dummy antenna simulating the effects of the antenna effective height, h_e 177
Figure H.1 – Diagram of Helmholtz coil method set-up 178
Figure H.2 – Variation of H/I across the central plane between the coils 180
Figure I.1 – Typical set-up for antenna pattern measurement 183
Figure I.2 − Definition of d_1 183
Figure I.3 − Definition of d_2 184
Figure I.4 − With d_1 held constant, d_2 is increased in x cm steps 185
Figure I.5 − With d_2 held constant, d_1 is increased in x cm steps 185
Figure I.6 − Distance and angle correction 187

Table 1 – Summary of calibration methods above 30 MHz for F_a 25

Table 2 – Calibration methods above 30 MHz by subclause number 26

Table 3 – Frequency increments for monopole antenna calibration 27

Table 4 – Example measurement uncertainty budget for F_{ac} of a monopole antenna calibrated by the ECSM using Equation (9) 33

Table 5 –Example measurement uncertainty budget for F_{aH} of a loop antenna measured in a TEM cell 37

Table 15 – Examples for valid use of Equation (65) 41

Table 16 – Example of an uncertainty budget for site insertion loss $A_i(i,j)$ 45

Table 17 – Example of an uncertainty budget for $K(i,j)$ as used by the TAM 46

Table 18 – Example of an uncertainty budget for F_{aH} of a loop antenna determined by the TAM – expanded uncertainty at 30 MHz 46

Table 19 – Example of an uncertainty budget for F_{aH} of a loop antenna determined by the current probe method – expanded uncertainty at 30 MHz 49

Table 20 – Example of an uncertainty budget for transfer impedance $|Z|$ according to the jig method of CISPR 16-1-2 50

Table 21 – Example of an uncertainty budget for F_{aH}(AUC) of a loop antenna determined by the standard antenna method – expanded uncertainty at 30 MHz 51

Table 6 – Frequency increments for broadband antenna calibration 52

Table 7 – Example measurement uncertainty budget for common components of a SIL measurement result evaluated from Equation (20) 62

Table 8 – Parameters used to determine phase centres of segments A and B 78

Table 9 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a horizontally-polarized biconical antenna measured by the SSM 87

Table 10 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a biconical antenna measured by the SAM in a FAR over the frequency range 30 MHz to 300 MHz 90

Table 11 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a tuned dipole antenna obtained by the SAM in a FAR at a free-space calibration site, using a calculable tuned dipole as the STA in the frequency range above 60 MHz 91

Table 12 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a biconical antenna measured using the SAM for vertical polarization over the frequency range 30 MHz to 300 MHz 94

Table 13 – Example measurement uncertainty budget for F_a of LPDA and hybrid antennas measured by the TAM at 4 m height for the frequency range 200 MHz to 3 GHz 97

Table 14 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a horn antenna measured by the TAM above 1 GHz for 3 m separation in free space 101

Table A.1 – Example type N male and female connector pin depths and tolerances using a type N pin-depth gauge 117

Table A.2 – Typical type N adaptor characteristics 118

Table B.1 – Antenna set-up for the SAM for tuned dipole antennas with averaging of $F_a(h,\mathrm{H})$ 122

Table B.2 – Antenna set-up for the SAM for biconical antennas with averaging of $F_a(h,\mathrm{H})$ 123

Table B.3 – Example measurement uncertainty budget for $F_a(h,\mathrm{H})$ of a biconical antenna measured by the SAM over the frequency range 30 MHz to 300 MHz 123

Table B.4 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a biconical antenna obtained by the SAM with averaging of $F_a(h,\mathrm{H})$ in the frequency range below 300 MHz 125

Table B.5 – Example measurement uncertainty budget for $F_a(h,\mathrm{H})$ of a biconical antenna obtained by the TAM with the antenna set-up specified in Table B.2 126

Table B.6 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a biconical antenna obtained by the TAM with averaging of $F_a(h,\mathrm{H})$ in the frequency range below 300 MHz 126

Table B.7 – Antenna set-ups for the SAM for determining F_a of tuned dipole antennas at specific frequencies in the range 30 MHz to 1 000 MHz 128

Table B.8 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a tuned dipole antenna obtained by the SAM using the antenna set-ups specified in Table B.7 129

Table B.9 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a tuned dipole antenna obtained by the TAM using the antenna set-ups specified in Table B.7 130

Table C.1 – Examples of the antenna height range h for horizontal polarization for an error ≤ 0,3 dB 145

Table C.2 – Correction factors $\Delta F_{a,SSM}$ to convert AF measured by SSM to F_a 146

Table C.3 – Mechanical dimensions for the biconical antenna [52] 147

Table G.1 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a monopole antenna measured by the SAM 170

Table H.1 – Example measurement uncertainty budget for F_{aH} of a loop antenna measured by the Helmholtz coil method for the frequency range 50 kHz to 150 kHz 181

Table I.1 – Correction of angle α for a distance of d_1 = 3 m (refer to Figure I.6) 186

Table I.2 – Example measurement uncertainty budget for antenna pattern measurement above 1 GHz 188

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE

_____

SPECIFICATION FOR RADIO DISTURBANCE AND IMMUNITY MEASURING APPARATUS AND METHODS –

Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – EMC antenna calibration

FOREWORD

1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This consolidated version of the official IEC Standard and its amendments has been prepared for user convenience.

CISPR 16-1-6 edition 1.2 contains the first edition (2014-12) [documents CISPR/A/1087/FDIS and CISPR/A/1098/RVD], its amendment 1 (2017-01) [documents CISPR/A/1195/FDIS and CISPR/A/1204/RVD] and its amendment 2 (2022-03) [documents CIS/A/1362/FDIS and CIS/A/1365/RVD].

In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendments 1 and 2. Additions are in green text, deletions are in strikethrough red text. A separate Final version with all changes accepted is available in this publication.

International Standard CISPR 16-1-6 has been prepared by CISPR subcommittee A: Radio-interference measurements and statistical methods.

It has the status of a basic EMC Standard in accordance with IEC Guide 107, *Electromagnetic compatibility – Guide to the drafting of electromagnetic compatibility publications.*

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts of CISPR 16 series, under the general title *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendments will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "http://webstore.iec.ch" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

SPECIFICATION FOR RADIO DISTURBANCE AND IMMUNITY MEASURING APPARATUS AND METHODS –

Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – EMC antenna calibration

1 Scope

This part of CISPR 16 provides procedures and supporting information for the calibration of antennas for determining antenna factors (AF) that are applicable to antennas intended for use in radiated disturbance measurements.

It has the status of a basic EMC Standard in accordance with IEC Guide 107, *Electromagnetic compatibility – Guide to the drafting of electromagnetic compatibility publications.*

The AF of an antenna is influenced by nearby surroundings and by its position in space relative to the radiating source. This standard focuses on antenna calibrations that provide the AF in a free-space environment in the direction of the boresight of the antenna. The frequency range addressed is 9 kHz to 18 GHz. The relevant antenna types covered in this standard are monopole, loop, dipole, biconical, log-periodic dipole-array (LPDA), hybrid and horn antennas.

Guidance is also provided on measurement uncertainties associated with each calibration method and configuration, and the test instrumentation used.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

CISPR 16-1-2, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Coupling devices for conducted disturbance measurements*

CISPR 16-1-4:~~2010~~2019, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antennas and test sites for radiated disturbance measurements*
~~CISPR 16-1-4:2010/AMD 1:2012~~

CISPR 16-1-5:2014, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antenna calibration sites and reference test sites for 5 MHz to 18 GHz*

IEC 60050-161, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 208
1 Domaine d'application 210
2 Références normatives 210
3 Termes, définitions et abréviations 211
3.1 Termes et définitions 211
3.1.1 Termes relatifs aux antennes 211
3.1.2 Termes relatifs au facteur d'antenne 215
3.1.3 Termes relatifs à l'emplacement de mesure 216
3.1.4 Autres termes 217
3.2 Abréviations 218
4 Concepts fondamentaux 219
4.1 Généralités 219
4.2 Concept de facteur d'antenne 219
4.3 Méthodes d'étalonnage pour des fréquences de 30 MHz et plus 220
4.3.1 Généralités 220
4.3.2 Distances de séparation minimales des antennes 220
4.3.3 Considérations générales pour la méthode TAM 221
4.3.4 Considérations générales pour la méthode SSM 221
4.3.5 Considérations générales pour la méthode SAM 221
4.4 Incertitudes de mesure pour les résultats des mesurages d'étalonnage des antennes 222
4.5 Synthèse des méthodes de mesure permettant d'obtenir l'AF 222
5 Méthodes d'étalonnage pour la gamme de fréquences comprise entre 9 kHz et 30 MHz 225
5.1 Étalonnage des antennes monopôles 225
5.1.1 Généralités 225
5.1.2 Étalonnage par la méthode ECSM 226
5.2 Étalonnage des antennes boucles 233
5.2.1 Généralités 233
5.2.2 Méthode des cellules TEM (Crawford) 234
5.2.3 Méthode à trois antennes (TAM) 238
5.2.4 Méthode de la sonde de courant (CPM) 248
5.2.5 Méthode de l'antenne étalon 251
6 Fréquences, matériel et vérifications de fonctionnement pour des étalonnages à des fréquences supérieures ou égales à 30 MHz 253
6.1 Fréquences d'étalonnage 253
6.1.1 Gammes et pas de fréquences d'étalonnage 253
6.1.2 Fréquence de transition pour les antennes hybrides 254
6.2 Exigences concernant les instruments de mesure pour les étalonnages d'antennes 255
6.2.1 Types de matériel 255
6.2.2 Désadaptation 257
6.2.3 Dynamique et reproductibilité de mesurage de SIL 258
6.2.4 Rapport signal/bruit 259
6.2.5 Mâts et câbles d'antennes 259
6.3 Vérifications de fonctionnement d'une AUC 260

6.3.1 Généralités 260
6.3.2 Équilibre d'une antenne 260
6.3.3 Caractéristique de polarisation croisée d'une antenne 260
6.3.4 Diagrammes de rayonnement d'une antenne 261
7 Paramètres et équations de base communs aux méthodes d'étalonnage d'antennes pour des fréquences au-delà de 30 MHz 262
7.1 Synthèse des méthodes de mesure permettant d'obtenir l'AF 262
7.2 Mesurages de la perte d'insertion de l'emplacement 262
7.2.1 Généralités 262
7.2.2 Méthode de mesure de SIL et de SA 262
7.2.3 Composantes d'incertitude communes d'un mesurage de SIL 264
7.3 Équations de base pour le calcul de l'AF à partir des mesurages de SIL et de SA 266
7.3.1 Facteur d'antenne issu des mesurages de SIL 266
7.3.2 Relation entre AF et SIL pour un emplacement d'étalonnage en espace libre 266
7.3.3 Relation entre AF et SIL pour un emplacement d'étalonnage avec un plan de masse de référence métallique 267
7.4 Équations pour le facteur AF et les incertitudes de mesure avec les méthodes TAM, SSM et SAM 268
7.4.1 Méthode TAM 268
7.4.2 SSM 273
7.4.3 Méthode SAM 276
7.5 Paramètres de spécification du centre de phase et de la position des antennes 278
7.5.1 Généralités 278
7.5.2 Position de référence et centres de phase des antennes LPDA et hybrides 279
7.5.3 Centres de phase des antennes cornets 282
8 Détails pour les méthodes d'étalonnage TAM, SAM et SSM pour des fréquences de 30 MHz et plus 284
8.1 Généralités 284
8.2 Considérations concernant les étalonnages F_a à l'aide de la méthode TAM 284
8.2.1 Considérations générales 284
8.2.2 Considérations concernant l'emplacement d'étalonnage et le montage d'antennes pour une utilisation avec la méthode TAM 285
8.2.3 Paramètres d'antennes pour un environnement en espace libre ou un emplacement sur plan de masse de référence 286
8.2.4 Validation de la méthode d'étalonnage 287
8.3 Considérations concernant les étalonnages F_a à l'aide de la méthode SAM 288
8.3.1 Considérations générales et emplacement d'étalonnage pour une utilisation de la méthode SAM 288
8.3.2 Méthodes d'étalonnage et montages d'antennes pour le facteur F_a par la méthode SAM 289
8.3.3 Paramètres de la STA 290
8.4 Étalonnages SSM avec un emplacement sur plan de masse de référence, à des fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz 291
8.4.1 Considérations générales et emplacement d'étalonnage pour la méthode SSM 291
8.4.2 Méthode d'étalonnage pour la SSM 291
8.4.3 Calcul de F_a 292
8.4.4 Incertitudes du facteur F_a obtenu avec la méthode SSM 292

9 Méthodes d'étalonnage pour des types d'antenne spécifiques pour des fréquences de 30 MHz et plus 293
9.1 Généralités 293
9.2 Étalonnages des antennes biconiques et hybrides dans un environnement en espace libre pour des fréquences comprises entre 30 MHz et 300 MHz et des doublets accordés pour des fréquences comprises entre 60 MHz et 1 000 MHz 293
9.2.1 Considérations générales et exigences concernant l'emplacement d'étalonnage 293
9.2.2 Méthode d'étalonnage et montage d'antennes pour une utilisation avec la méthode SAM 294
9.2.3 Incertitudes de F_a déterminées par la méthode SAM 295
9.2.4 Montage d'antennes à utiliser avec la méthode TAM (variante) 297
9.3 Étalonnage des antennes biconiques (30 MHz à 300 MHz) et hybrides, à l'aide des méthodes SAM et VP avec un emplacement sur plan de masse de référence 298
9.3.1 Considérations générales et exigences concernant l'emplacement d'étalonnage 298
9.3.2 Méthode d'étalonnage et montage d'antennes 298
9.3.3 Incertitudes de F_a déterminées par la méthode SAM 299
9.4 Étalonnage des antennes LPDA, hybrides et cornets dans un environnement en espace libre, pour des fréquences comprises entre 200 MHz et 18 GHz 301
9.4.1 Considérations générales et emplacement d'étalonnage pour un environnement en espace libre 301
9.4.2 Étalonnages utilisant la méthode TAM 302
9.4.3 Montage d'antennes à utiliser avec la méthode SAM 304
9.4.4 Autre montage d'antennes pour un emplacement comportant un matériau absorbant sur le sol 304
9.5 Étalonnage des antennes cornets et LPDA dans une FAR, pour des fréquences comprises entre 1 GHz et 18 GHz 305
9.5.1 Étalonnage utilisant la méthode TAM 305
9.5.2 Étalonnage et montage d'antennes pour la méthode SAM 309
Annexe A (informative) Historique et justifications des méthodes d'étalonnage des antennes 310
A.1 Justifications de la nécessité de plusieurs méthodes d'étalonnage et de l'utilisation d'un emplacement sur plan de masse de référence 310
A.2 Mesures spéciales propres à l'étalonnage des antennes omnidirectionnelles 312
A.2.1 Généralités 312
A.2.2 Difficultés d'étalonnage des antennes omnidirectionnelles 312
A.2.3 Réduction au minimum des réflexions des supports d'antennes et du rayonnement des câbles 312
A.2.4 Conicité de champ et montage d'antennes monocônes pour l'étalonnage des antennes biconiques à polarisation verticale 314
A.2.5 Utilisation de la HP ou de la VP dans une FAR 314
A.2.6 Situation de remplacement où les modèles de STA et d'AUC sont identiques 315
A.3 Étalonnages avec des antennes doublets calculables à large bande 315
A.3.1 Inconvénients des antennes doublets accordées 315
A.3.2 Avantages des antennes doublets calculables à large bande 316
A.3.3 Inconvénients des antennes doublets calculables 316
A.4 Justifications pour le facteur F_a et fréquence de transition entre les antennes biconiques et LPDA 316
A.4.1 Justifications pour le facteur F_a 316

A.4.2 Fréquence de transition entre les antennes biconiques et les antennes LPDA 317
A.4.3 Types d'éléments biconiques 318
A.5 Sources d'incertitude de mesure plus grande du facteur F_a avec la méthode SSM 318
A.6 Étalonnage des antennes LPDA en utilisant des distances de séparation réduites 322
A.6.1 Étalonnage des antennes LPDA en utilisant des distances de séparation réduites 322
A.6.2 Correction de l'intensité de champ électrique afin de tenir compte du centre de phase des antennes LPDA 322
A.7 Discrimination de polarisation croisée des antennes LPDA 323
A.8 Conseils pratiques pour l'instrumentation de mesure 324
A.8.1 Rapport signal/bruit 324
A.8.2 Profondeur des broches de connecteurs 327
A.8.3 Influence de l'adaptateur ajouté dans un mesurage "sur câbles traversants" 327
A.8.4 Niveau de compression 327
A.8.5 Fonction de pente de la puissance source au-delà d'une fréquence de 6 GHz 328
A.8.6 Pas de fréquence pour la détection des résonances 328
A.8.7 Affaiblissement de réflexion ou ROS 328
A.9 Considérations relatives à l'incertitude 329
A.9.1 Généralités 329
A.9.2 Incertitudes réalisables pour le facteur F_a 329
A.9.3 Incertitudes des doublets au-dessus d'un plan de masse de référence 329
A.9.4 Vérification de l'incertitude par comparaison des méthodes 330
Annexe B (normative) Étalonnage des antennes biconiques et des antennes doublets accordées au-dessus d'un plan de masse de référence en utilisant les méthodes TAM et SAM 331
B.1 Généralités 331
B.2 Caractéristiques des antennes biconiques et des antennes doublets 331
B.3 Fréquences 332
B.4 Mesurage du facteur $F_a(h,p)$ des antennes biconiques et doublets accordées et déduction de F_a par calcul de la moyenne de $F_a(h,p)$ pour des fréquences comprises entre 30 MHz et 300 MHz 332
B.4.1 Généralités 332
B.4.2 Mesurage de $F_a(h,\mathrm{H})$ par la méthode SAM et déduction de F_a 332
B.4.3 Mesurage de $F_a(h,\mathrm{H})$ par la méthode TAM et déduction de F_a 336
B.5 Mesurage du facteur F_a des doublets accordés placés au-dessus d'un plan de masse de référence dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 1 000 MHz 338
B.5.1 Généralités 338
B.5.2 Mesurage de F_a par la méthode SAM 338
B.5.3 Mesurage de F_a par la méthode TAM 340
Annexe C (informative) Justifications relatives aux équations utilisées dans l'étalonnage des antennes et informations pertinentes concernant les caractéristiques d'antennes pour l'analyse d'incertitude dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 1 GHz 342
C.1 Généralités 342
C.2 Facteur d'antenne et gain d'antenne 342

C.2.1 Relation entre l'AF et le gain pour les antennes dans un environnement en espace libre 342
C.2.2 Relation entre l'AF et le gain pour les antennes monopôles sur un plan de masse de référence de grande surface 344
C.3 Équations pour la perte d'insertion entre les antennes 345
C.3.1 Perte d'insertion d'emplacement mesurée à un emplacement d'étalonnage en espace libre 345
C.3.2 Perte d'insertion d'emplacement mesurée à un emplacement sur plan de masse de référence métallique 347
C.3.3 Affaiblissement de l'emplacement mesuré avec un emplacement sur plan de masse de référence métallique 349
C.4 Contribution à l'incertitude due aux effets de champ proche 350
C.5 Contribution à l'incertitude due au couplage de proximité des antennes 351
C.6 Contribution à l'incertitude due à la réflexion sur le plan de masse de référence 353
C.6.1 Couplage avec la représentation sur le plan de masse de référence 353
C.6.2 Facteurs de correction $\Delta F_{a,SSM}$ pour le facteur F_a d'une antenne biconique 359
C.7 Contribution à l'incertitude due au diagramme de rayonnement des antennes 361
C.7.1 Généralités 361
C.7.2 Antennes biconiques 362
C.7.3 Antennes LPDA 363
C.7.4 Antennes hybrides 363
C.7.5 Antennes cornets et LPDA pour des fréquences comprises entre 1 GHz et 18 GHz 364
Annexe D (informative) Historique et justifications pour l'étalonnage des antennes à des fréquences au-delà de 1 GHz 369
D.1 Incertitude de désadaptation 369
D.2 Couplage mutuel entre les antennes et réflexion dans la chambre 369
D.3 Distance de séparation des antennes et centre de phase 370
D.4 Exemple de gain d'une antenne DRH à une distance de 1 m 372
Annexe E (informative) Notes relatives aux budgets d'incertitude de mesure 374
E.1 Généralités 374
E.2 Notes pour les budgets d'incertitude de mesure 374
Annexe F (informative) Incertitudes de désadaptation dues à un dispositif à deux ports connecté entre un port d'émission et un port de réception 385
Annexe G (informative) Méthode de vérification pour l'étalonnage des antennes monopôles et analyse d'incertitude de la méthode ECSM 387
G.1 Méthode de vérification pour l'étalonnage des antennes monopôles par la méthode des ondes planes dans une gamme de fréquences de 5 MHz à 30 MHz 387
G.1.1 Méthode d'étalonnage 387
G.1.2 Évaluation d'incertitude pour l'étalonnage d'antennes monopôles par la méthode des ondes planes 388
G.2 Analyse d'incertitude de l'ESCM 389
G.2.1 Effet d'une longueur de fouet de plus de $\lambda/8$ 389
G.2.2 Effet sur le facteur AF d'une antenne monopôle montée sur un trépied 391
G.2.3 Antenne monopôle recevant un champ électrique 392
G.2.4 Méthode ECSM 393
G.2.5 Incertitudes associées à la méthode ECSM 395
G.2.6 Variante à l'antenne fictive pour laquelle $F_{ac} = V_D - V_L$ 397

Annexe H (informative) Méthode de la bobine d'Helmholtz pour l'étalonnage d'antennes boucles jusqu'à une fréquence de 150 kHz 399
H.1 Méthode de mesure 399
H.2 Incertitudes 402
Annexe I (normative) Méthode de mesure du diagramme de rayonnement d'une antenne dans la plage de fréquences supérieure à 1 GHz, avec budget de l'incertitude de mesure 403
I.1 Généralités 403
I.2 Montage d'essai 404
I.3 Méthode d'essai 406
I.4 Rapport d'essai 409
I.5 Budget d'incertitude 409
Annexe J (informative) Simulation de Monte-Carlo de l'incertitude de mesure d'étalonnage d'une antenne boucle TAM – Exemple de code source 411
Bibliographie 414

Figure 1 – Montage pour la détermination du facteur AF au moyen d'un analyseur de réseau 229
Figure 2 – Montage pour la détermination du facteur AF au moyen d'un récepteur de mesure et d'un générateur de signaux 230
Figure 3 – Exemple de montage d'un condensateur dans l'antenne fictive 231
Figure 4 – Schéma de principe d'un montage à cellules TEM pour antennes boucles passives 236
Figure 5 – Schéma de principe d'un montage à cellules TEM pour antennes boucles actives 237
Figure 21 – Dispositions de paires d'antennes boucles pour la méthode des trois antennes 242
Figure 22 – Exactitude de la formule de Greene et de la formule intégrale par rapport à la fréquence pour r_i = 0,05 m, r_j = 0,3 m, et d = 0,39 m 243
Figure 23 – Exemples de l'influence du plan de masse sur la SIL en condition d'espace libre 244
Figure 24 – Définitions des paramètres utilisés dans l'évaluation de l'incertitude de mesure pour $K(i,j)$ 246
Figure 25 – Disposition de l'antenne pour la méthode de la sonde de courant (CPM) 248
Figure 26 – Disposition de l'antenne pour la méthode de l'antenne étalon 252
Figure 6 – Exemple de pointe résonnante due à des connexions d'éléments biconiques inadaptées, avec pas de 2 MHz 254
Figure 7 – Montage d'antennes pour le mesurage de SIL à un emplacement d'étalonnage en espace libre 264
Figure 8 – Montage d'antennes pour le mesurage de SIL et de SA à un emplacement d'étalonnage sur plan de masse de référence 264
Figure 9 – Montage d'antennes pour la méthode TAM à un emplacement d'étalonnage en espace libre 269
Figure 10 – Montage d'antennes pour la méthode TAM sur un emplacement d'étalonnage avec plan de masse de référence métallique 272
Figure 11 – Montage d'antennes pour la méthode SSM 274
Figure 12 – Montage d'antennes pour la méthode SAM sur emplacement d'étalonnage avec un plan de masse de référence métallique 277
Figure 13 – Distance de séparation par rapport au centre de phase d'une antenne LPDA 280

Figure 14 – Antenne LPDA à géométrie conique courbe 282

Figure 15 – Distance de séparation par rapport au centre de phase des antennes cornets (voir détails en [49]) 283

Figure 16 – Représentation schématique d'une antenne DRH illustrant les emplacements relatifs du point de champ et du centre de phase de l'antenne 284

Figure 17 – Montage d'antennes biconiques pour la méthode SAM utilisant la polarisation verticale, et illustrant l'antenne monocône appariée ainsi qu'un exemple d'AUC biconique à éléments contractiles 299

Figure 18 – Montage d'essai pour l'étalonnage des antennes LPDA et hybrides positionnées à une hauteur élevée 302

Figure 19 – Montage pour antennes LPDA au-dessus d'un matériau absorbant 305

Figure 20 – Montage pour les mesurages d'émission au moyen d'un analyseur de réseau 307

Figure A.1 – Illustration des angles des rayons électromagnétiques sous-tendus entre l'antenne LPDA balayée, l'antenne LPDA à hauteur fixe et le plan de masse de référence 320

Figure A.2 – Facteur F_a d'une antenne biconique avec un symétriseur de 200 Ω, mesuré par la méthode VP de 9.3 et par la méthode SSM de 8.4 sans correction 321

Figure A.3 – Facteur F_a d'une antenne biconique avec un symétriseur de 200 Ω, mesuré par la méthode VP de 9.3 et par la méthode SSM de 8.4 avec correction 321

Figure A.4 – Distance de séparation par rapport au centre de phase d'une antenne LPDA 323

Figure A.5 – Propriétés statistiques de balayages S_{21} multiples (minimum, maximum et valeur moyenne) 325

Figure A.6 – Écart-type de S_{21} 326

Figure A.7 – Écart-type normalisé de S_{21} 326

Figure C.1 – Modèle simplifié d'une antenne de réception 343

Figure C.2 – Mesurage de la perte d'insertion pour l'étalonnage d'antennes à un emplacement d'étalonnage en espace libre 345

Figure C.3 – Mesurage de la perte d'insertion pour l'étalonnage d'antennes à un emplacement d'étalonnage avec plan de masse de référence métallique 347

Figure C.4 – Comparaison de l'intensité de champ donnée par l'Équation (C.17) avec celle de la région de champ proche donnée par l'Équation (C.31) 351

Figure C.5 – Calculs théoriques des effets du couplage de proximité sur le facteur AF obtenu par la méthode TAM (conditions en espace libre) 353

Figure C.6 – Écart de l'AF par rapport à la valeur en espace libre F_a dû au couplage mutuel avec la représentation dans un plan de masse de référence métallique (résultats théoriques) 355

Figure C.7 – Variation de $F_a(h,\mathrm{H})$ d'une antenne biconique avec un symétriseur de 50 Ω, et une gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 320 MHz à des hauteurs avec une distance de séparation de 0,5 m au-dessus d'un plan de masse de référence compris entre 1 m et 4 m 356

Figure C.8 – AF de la Figure C.7 normalisé à l'AF en espace libre 357

Figure C.9 – Variation de $F_a(h,\mathrm{H})$ d'une antenne biconique avec un symétriseur de 200 Ω, et une gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 320 MHz à des hauteurs avec une distance de séparation de 0,5 m au-dessus d'un plan de masse de référence compris entre 1 m et 4 m 358

Figure C.10 – Diagramme d'une section triangulaire d'élément d'antenne biconique 361

Figure C.11 – Exemples de diagrammes de rayonnement (gain relatif réalisé) de deux exemples d'antennes biconiques comparées à l'antenne doublet accordée demi-onde théorique 362

Figure C.12 – Exemples de diagrammes de rayonnement (gain relatif réalisé) de trois exemples d'antennes LPDA comparées à une antenne doublet accordée demi-onde théorique 363

Figure C.13 – Exemples de diagrammes de rayonnement (gain relatif réalisé) d'un exemple d'antenne hybride comparée à une antenne doublet accordée demi-onde théorique 364

Figure C.14 – Exemple de diagrammes de rayonnement pour une antenne DRH classique 365

Figure C.15 – Exemple de diagrammes de rayonnement pour une antenne DRH nouvelle 366

Figure C.16 – Exemple de diagrammes de rayonnement pour une antenne LPDA classique 367

Figure C.17 – Exemple de diagrammes de rayonnement pour une antenne LPDA de type V 368

Figure D.1 – Centres de phase relatifs d'une antenne DRH et d'une antenne LPDA 370

Figure D.2 – Système de transmission entre une antenne cornet et une antenne LPDA 371

Figure D.3 – Facteurs AF mesurés d'une antenne DRH à une fréquence de 4,5 GHz 372

Figure D.4 – Graphique illustrant le gain réalisé à une distance de 1 m pour une antenne DRH 373

Figure E.1 – Comparaison de SIL mesurée et de SIL prévue pour une antenne doublet calculable – élément à 60 MHz 377

Figure E.2 – Comparaison de SIL mesurée et de SIL prévue pour une antenne doublet calculable – élément à 180 MHz 378

Figure E.3 – Réflectivité des matériaux absorbants de la chambre 382

Figure E.4 – Système d'alignement laser 383

Figure F.1 – Schéma de fluence d'un dispositif à deux ports entre un port d'émission et un port de réception 385

Figure F.2 – Réduction de la fluence de signal 385

Figure G.1 – Diagramme illustrant la méthode de connexion du fouet en laiton au connecteur de cloison de type N mâle 388

Figure G.2 – Graphique de l'amplitude du terme du rapport tan(…) dans l'Équation (4) de 5.1.2.2 390

Figure G.3 – Représentation graphique de l'Équation (4) de 5.1.2.2, capacité propre C_a d'une antenne monopôle d'une longueur de 1 m 390

Figure G.4 – Représentation graphique de l'Équation (5) de 5.1.2.2 facteur de correction de la hauteur L_h 391

Figure G.5 – Montage d'étalonnage composé d'une antenne biconique, d'une antenne boucle et d'une antenne monopôle élevée avec des câbles d'alimentation verticaux 392

Figure G.6 – Représentation de circuit équivalent pour un système d'antennes monopôles 393

Figure G.7 – Etalonnage de l'antenne monopôle à l'aide de la méthode ECSM 394

Figure G.8 – Représentation de circuit équivalent pour la méthode ECSM 394

Figure G.9 – Représentation de circuit simplifiée pour la Figure G.8 395

Figure G.10 – Circuit pour antenne fictive avec simulation des effets de la hauteur d'antenne effective h_e 398

Figure H.1 – Schéma de montage de la méthode de la bobine d'Helmholtz 399

Figure H.2 – Variation de H/I dans le plan central entre les bobines 401

Figure I.1 – Montage d'essai classique pour le mesurage du diagramme de rayonnement d'une antenne 404

Figure I.2 – Définition de d_1 405
Figure I.3 – Définition de d_2 405
Figure I.4 – Avec une distance d_1 fixe, d_2 est augmentée par pas de x cm 406
Figure I.5 – Avec une distance d_2 fixe, d_1 est augmentée par pas de x cm 407
Figure I.6 – Correction d'angle et de distance 408

Tableau 1 – Synthèse des méthodes d'étalonnage au-delà d'une fréquence de 30 MHz pour F_a 223
Tableau 2 – Méthodes d'étalonnage au-delà d'une fréquence de 30 MHz par numéro de paragraphe 224
Tableau 3 – Pas de fréquences pour l'étalonnage des antennes monopôles 225
Tableau 4 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le F_{ac} d'une antenne monopôle étalonnée par la méthode ECSM à l'aide de l'Équation (9) 233
Tableau 5 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour F_{aH} d'une antenne boucle mesuré dans une cellule TEM 238
Tableau 15 – Exemples d'utilisation valable de l'Équation (65) 242
Tableau 16 – Exemple de budget d'incertitude pour la perte d'insertion de l'emplacement $A_i(i,j)$ 246
Tableau 17 – Exemple de budget d'incertitude pour $K(i,j)$ utilisé par la méthode TAM 247
Tableau 18 – Exemple de budget d'incertitude pour F_{aH} d'une antenne boucle, déterminé par la méthode à trois antennes (TAM) – incertitude élargie à 30 MHz 247
Tableau 19 – Exemple de budget d'incertitude pour F_{aH} d'une antenne boucle, déterminé par la méthode de la sonde de courant – incertitude élargie à 30 MHz 251
Tableau 20 – Exemple de budget d'incertitude pour l'impédance de transfert $|Z|$ selon la méthode du gabarit-support de la CISPR 16-1-2 251
Tableau 21 – Exemple de budget d'incertitude pour F_{aH}(AUC) d'une antenne boucle, déterminé par la méthode de l'antenne étalon – incertitude élargie à 30 MHz 253
Tableau 6 – Pas de fréquence pour l'étalonnage d'antennes à large bande 253
Tableau 7 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour les composantes communes d'un résultat de mesure de SIL évalué à partir de l'Équation (20) 266
Tableau 8 – Paramètres utilisés pour déterminer les centres de phase des segments A et B 282
Tableau 9 – Exemple de budget d'incertitude de mesure de F_a pour une antenne biconique à polarisation horizontale, mesuré par la méthode SSM 293
Tableau 10 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a d'une antenne biconique mesuré par la méthode SAM dans une FAR dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 300 MHz 296
Tableau 11 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a d'une antenne doublet accordée obtenu par la méthode SAM dans une FAR sur un emplacement d'étalonnage en espace libre, en utilisant un doublet accordé calculable comme STA dans la gamme de fréquences au-delà de 60 MHz 297
Tableau 12 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a d'une antenne biconique, mesuré en utilisant la méthode SAM pour une polarisation verticale dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 300 MHz 300
Tableau 13 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a des antennes LPDA et hybrides, mesuré en utilisant la méthode TAM à une hauteur de 4 m pour la gamme de fréquences comprise entre 200 MHz et 3 GHz 303
Tableau 14 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a d'une antenne cornet, mesuré par la méthode TAM au-delà d'une fréquence de 1 GHz pour une distance de séparation de 3 m en espace libre 309

Tableau A.1 – Exemple de profondeurs de broche de connecteurs mâle et femelle de type N et tolérances correspondantes avec un calibre de profondeur de broche de type N 327

Tableau A.2 – Caractéristiques types d'un adaptateur de type N 327

Tableau B.1 – Montage d'antennes pour la méthode SAM pour des antennes doublets accordées avec calcul de la moyenne de $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ 333

Tableau B.2 – Montage d'antennes pour la méthode SAM pour des antennes biconiques avec calcul de la moyenne de $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ 333

Tableau B.3 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ d'une antenne biconique, mesuré par la méthode SAM dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 300 MHz 334

Tableau B.4 – Exemple de budget d'incertitude de mesure de F_{a} d'une antenne biconique par la méthode SAM avec calcul de la moyenne de $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ dans la gamme de fréquences en dessous de 300 MHz 335

Tableau B.5 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du facteur $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ d'une antenne biconique, obtenu par la méthode TAM avec le montage d'antennes spécifié au Tableau B.2 337

Tableau B.6 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du F_{a} d'une antenne biconique, obtenu par la méthode TAM avec calcul de la moyenne de $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ dans la gamme de fréquences en dessous de 300 MHz 338

Tableau B.7 – Montages d'antennes adaptés à la méthode SAM pour la détermination du facteur F_{a} des antennes doublets accordées à des fréquences spécifiques dans la gamme comprise entre 30 MHz et 1 000 MHz 339

Tableau B.8 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_{a} d'une antenne doublet accordée, obtenu par la méthode SAM, en utilisant les montages d'antennes spécifiés dans le Tableau B.7 340

Tableau B.9 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_{a} d'une antenne doublet accordée, obtenu par la méthode TAM, en utilisant les montages d'antennes spécifiés dans le Tableau B.7 341

Tableau C.1 – Exemples de plage de hauteurs d'antenne h pour une polarisation horizontale dans le cas d'une erreur ≤ 0,3 dB 359

Tableau C.2 – Facteurs de correction $\Delta F_{\mathrm{a,SSM}}$ qui permettent de convertir l'AF mesuré par la méthode SSM en facteur F_{a} 360

Tableau C.3 – Dimensions mécaniques pour l'antenne biconique [52] 361

Tableau G.1 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du F_{a} d'une antenne monopôle au moyen de la SAM 389

Tableau H.1 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du F_{aH} d'une antenne boucle, mesuré par la méthode de la bobine d'Helmholtz pour la gamme de fréquences comprise entre 50 kHz et 150 kHz 402

Tableau I.1 – Correction de l'angle α pour une distance d_1 = 3 m (voir Figure I.6) 408

Tableau I.2 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du diagramme de rayonnement d'une antenne au-dessus de 1 GHz 410

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES

_____

SPÉCIFICATIONS DES MÉTHODES ET DES APPAREILS DE MESURE DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES ET DE L'IMMUNITÉ AUX PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES –

Partie 1-6: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Étalonnage des antennes CEM

AVANT-PROPOS

1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

Cette version consolidée de la Norme IEC officielle et de ses amendements a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.

La CISPR 16-1-6 édition 1.2 contient la première édition (2014-12) [documents 65C/583/FDIS et 65C/589/RVD], son amendement 1 (2017-01) [documents 65C/684/FDIS et 65C/691/RVD] et son amendement 2 (2022-03) [documents CIS/A/1362/FDIS et CIS/A/1365/RVD].

Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par les amendements 1 et 2. Les ajouts sont en vert, les suppressions sont en rouge, barrées. Une version Finale avec toutes les modifications acceptées est disponible dans cette publication.

La Norme internationale CISPR 16-1-6 a été établie par le sous-comité A du CISPR: Mesures des perturbations radioélectriques et méthodes statistiques.

Elle a le statut de Norme fondamentale en CEM en accord avec le Guide 107 de l'IEC, *Compatibilité électromagnétique – Guide pour la rédaction des publications sur la compatibilité électromagnétique.*

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CISPR 16, publiées sous le titre général *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de ses amendements ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "http://webstore.iec.ch" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo *"colour inside"* qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

SPÉCIFICATIONS DES MÉTHODES ET DES APPAREILS DE MESURE DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES ET DE L'IMMUNITÉ AUX PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES –

Partie 1-6: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Étalonnage des antennes CEM

1 Domaine d'application

La présente partie de la CISPR 16 fournit des procédures et des informations à l'appui concernant l'étalonnage des antennes afin de déterminer les facteurs d'antenne (AF) applicables aux antennes destinées à être utilisées pour les mesurages des perturbations rayonnées.

Elle a le statut de Norme fondamentale en CEM en accord avec le Guide 107 de l'IEC, *Compatibilité électromagnétique – Guide pour la rédaction des publications sur la compatibilité électromagnétique.*

Le facteur d'antenne est influencé par l'environnement immédiat et par sa position dans l'espace par rapport à la source de rayonnement. La présente norme se concentre sur les étalonnages d'antennes qui fournissent l'AF dans un environnement en espace libre dans l'axe de visée de l'antenne. La gamme de fréquences traitée est comprise entre 9 kHz et 18 GHz. Les types d'antenne appropriés couverts dans la présente norme sont les suivants: antennes monopôles, boucles, doublets, biconiques, log-périodiques à doublet (LPDA), hybrides et cornets.

Des lignes directrices sont également fournies concernant les incertitudes de mesure associées à chaque méthode et à chaque configuration d'étalonnage, ainsi qu'à l'instrumentation d'essai utilisée.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CISPR 16-1-2, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-2: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Dispositifs de couplage pour la mesure des perturbations conduites*

CISPR 16-1-4:~~2010~~2019, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-4: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Antennes et emplacements d'essai pour les mesures des perturbations rayonnées*
~~CISPR 16-1-4:2010/AMD 1:2012~~

CISPR 16-1-5:2014, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-5: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations*

radioélectriques – Emplacements d'étalonnage d'antenne et emplacements d'essai de référence pour la plage comprise entre 5 MHz et 18 GHz

IEC 60050-161, *Vocabulaire Électrotechnique International (VEI) – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

Guide ISO/IEC 98-3:2008*, Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

CISPR 16-1-6

Edition 1.2 2022-03
CONSOLIDATED VERSION

FINAL VERSION

VERSION FINALE

colour inside

INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE
COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES

BASIC EMC PUBLICATION
PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM

Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – EMC antenna calibration

Spécification des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-6: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Étalonnage des antennes CEM



CISPR 16-1-6:2014-12+AMD1:2017-01+AMD2:2022-03 CSV(en-fr)

CONTENTS

FOREWORD 11
1 Scope 13
2 Normative references 13
3 Terms, definitions and abbreviations 14
3.1 Terms and definitions 14
3.1.1 Antenna terms 14
3.1.2 Antenna factor terms 17
3.1.3 Measurement site terms 18
3.1.4 Other terms 19
3.2 Abbreviations 20
4 Fundamental concepts 21
4.1 General 21
4.2 The concept of antenna factor 21
4.3 Calibration methods for 30 MHz and above 22
4.3.1 General 22
4.3.2 Antenna minimum separation distances 22
4.3.3 General considerations for the TAM 22
4.3.4 General considerations for the SSM 22
4.3.5 General considerations for the SAM 23
4.4 Measurement uncertainties for antenna calibration measurement results 23
4.5 Summary of methods of measurement to obtain AF 24
5 Calibration methods for the frequency range 9 kHz to 30 MHz 26
5.1 Calibration of monopole antennas 26
5.1.1 General 26
5.1.2 Calibration by the ECSM 27
5.2 Calibration of loop antennas 33
5.2.1 General 33
5.2.2 TEM (Crawford) cell method 34
5.2.3 Three antenna method (TAM) 37
5.2.4 Current probe method (CPM) 47
5.2.5 Standard antenna method 50
6 Frequencies, equipment and functional checks for calibrations at or above 30 MHz 52
6.1 Calibration frequencies 52
6.1.1 Calibration frequency ranges and increments 52
6.1.2 Transition frequency for hybrid antennas 53
6.2 Measurement instrumentation requirements for antenna calibrations 53
6.2.1 Equipment types 53
6.2.2 Mismatch 55
6.2.3 Dynamic range and reproducibility of SIL measurement 56
6.2.4 Signal-to-noise ratio 57
6.2.5 Antenna masts and cables 57
6.3 Functional checks of an AUC 58
6.3.1 General 58
6.3.2 Balance of an antenna 58
6.3.3 Cross-polar performance of an antenna 58
6.3.4 Radiation patterns of an antenna 59

7 Basic parameters and equations common to antenna calibration methods for frequencies above 30 MHz 59
7.1 Summary of methods for measurements to obtain AF 59
7.2 Site insertion loss measurements 60
7.2.1 General 60
7.2.2 SIL and SA measurement procedure 60
7.2.3 Common uncertainty components of a SIL measurement 61
7.3 Basic equations for the calculation of AF from SIL and SA measurements 63
7.3.1 Antenna factor from SIL measurements 63
7.3.2 Relationship of AF and SIL for a free-space calibration site 63
7.3.3 Relationship of AF and SIL for a calibration site with a metal ground plane 63
7.4 Equations for AF and measurement uncertainties using the TAM, SSM, and SAM 65
7.4.1 TAM 65
7.4.2 SSM 70
7.4.3 SAM 72
7.5 Parameters for specifying antenna phase centre and position 74
7.5.1 General 74
7.5.2 Reference position and phase centres of LPDA and hybrid antennas 75
7.5.3 Phase centres of horn antennas 78
8 Details for TAM, SAM, and SSM calibration methods for frequencies of 30 MHz and above 80
8.1 General 80
8.2 Considerations for F_a calibrations using TAM 80
8.2.1 General considerations 80
8.2.2 Calibration site and antenna set-up considerations for use with the TAM 80
8.2.3 Antenna parameters for a free-space environment or a ground-plane site 82
8.2.4 Validation of calibration method 83
8.3 Considerations for F_a calibrations using the SAM 83
8.3.1 General considerations and calibration site for use of the SAM 83
8.3.2 Calibration procedures and antenna set-ups for F_a by the SAM 84
8.3.3 Parameters of the STA 84
8.4 SSM calibrations at a ground-plane site, 30 MHz to 1 GHz 85
8.4.1 General considerations and calibration site for SSM 85
8.4.2 Calibration procedure for SSM 86
8.4.3 Calculation of F_a 86
8.4.4 Uncertainties of F_a obtained using SSM 87
9 Calibration procedures for specific antenna types for frequencies of 30 MHz and above 88
9.1 General 88
9.2 Calibrations for biconical and hybrid antennas in a free-space environment for 30 MHz to 300 MHz, and tuned dipoles for 60 MHz to 1 000 MHz 88
9.2.1 General considerations and calibration site requirements 88
9.2.2 Calibration procedure and antenna set-up for use with the SAM 88
9.2.3 Uncertainties of F_a determined by the SAM 89
9.2.4 Antenna set-up for use with the TAM (alternative) 91
9.3 Calibration of biconical (30 MHz to 300 MHz) and hybrid antennas, using the SAM and VP at a ground-plane site 91

9.3.1 General considerations and calibration site requirements 91
9.3.2 Calibration procedure and antenna set-up 92
9.3.3 Uncertainties of F_a determined with the SAM 93
9.4 Calibration of LPDA, hybrid, and horn antennas in a free-space environment, 200 MHz to 18 GHz 94
9.4.1 General considerations and calibration site for a free-space environment 94
9.4.2 Calibrations using the TAM 96
9.4.3 Antenna set-up for use with the SAM 97
9.4.4 Alternative antenna set-up for site with absorber on the ground 97
9.5 Calibration of horn and LPDA antennas in a FAR, 1 GHz to 18 GHz 98
9.5.1 Calibration using the TAM 98
9.5.2 Calibration and antenna set-up for the SAM 102
Annex A (informative) Background information and rationale for the methods of antenna calibration 103
A.1 Rationale for the need for several calibration methods and for use of a ground-plane site 103
A.2 Special measures for calibration of omnidirectional antennas 104
A.2.1 General 104
A.2.2 Difficulties with calibration of omnidirectional antennas 105
A.2.3 Minimizing reflections from antenna supports and radiation from cables 105
A.2.4 Field taper and monocone set-up for VP biconical calibration 106
A.2.5 Use of HP or VP in a FAR 107
A.2.6 Substitution where the STA is the same model as the AUC 107
A.3 Calibrations using broadband calculable dipole antennas 107
A.3.1 Disadvantages of tuned dipole antennas 107
A.3.2 Advantages of broadband calculable dipole antennas 108
A.3.3 Disadvantages of calculable dipole antennas 108
A.4 Rationale for F_a and biconical/LPDA antenna cross-over frequency 108
A.4.1 Rationale for F_a 108
A.4.2 Cross-over frequency from biconical to LPDA antennas 109
A.4.3 Biconical element designs 109
A.5 Sources of increased uncertainty in measurement of F_a by the SSM 110
A.6 Calibration of LPDA antennas using smaller separation distances 112
A.6.1 Calibration of LPDA antennas using smaller separation distances 112
A.6.2 Correction of electric field strength to account for phase centre of LPDA antennas 113
A.7 Cross-polar discrimination of LPDA antennas 114
A.8 Tips for measurement instrumentation 115
A.8.1 Signal-to-noise ratio 115
A.8.2 Connector pin depth 117
A.8.3 Effect of added adaptor in a “cable-through” measurement 117
A.8.4 Compression level 118
A.8.5 Source power slope function above 6 GHz 118
A.8.6 Frequency increment for detection of resonances 118
A.8.7 Return loss or VSWR 118
A.9 Uncertainty considerations 119
A.9.1 General 119
A.9.2 Achievable uncertainties for F_a 119
A.9.3 Uncertainties of dipoles above a ground plane 119

A.9.4 Verification of uncertainty by comparison of methods 120
Annex B (normative) Calibration of biconical antennas and tuned dipole antennas above a ground plane using the TAM and the SAM 121
B.1 General 121
B.2 Characteristics of biconical antennas and dipole antennas 121
B.3 Frequencies 121
B.4 Measurement of $F_a(h,p)$ of biconical and tuned dipole antennas and derivation of F_a by averaging $F_a(h,p)$, 30 MHz to 300 MHz 122
B.4.1 General 122
B.4.2 Measurement of $F_a(h,H)$ by the SAM and derivation of F_a 122
B.4.3 Measurement of $F_a(h,H)$ by the TAM and derivation of F_a 125
B.5 Measurement of F_a of tuned dipoles placed high above a ground plane in the frequency range 30 MHz to 1 000 MHz 127
B.5.1 General 127
B.5.2 Measurement of F_a by the SAM 127
B.5.3 Measurement of F_a by the TAM 129
Annex C (informative) Rationale for the equations used in antenna calibration and relevant information about antenna characteristics for uncertainty analysis in the frequency range 30 MHz to 1 GHz 131
C.1 General 131
C.2 Antenna factor and antenna gain 131
C.2.1 Relationship between AF and gain for antennas in a free-space environment 131
C.2.2 Relationship between AF and gain for monopole antennas on a large ground plane 133
C.3 Equations for the insertion loss between antennas 133
C.3.1 Site insertion loss measured at a free-space calibration site 133
C.3.2 Site insertion loss measured at a metal ground-plane site 135
C.3.3 Site attenuation measured at a metal ground-plane site 137
C.4 Uncertainty contribution caused by near-field effects 138
C.5 Uncertainty contribution due to the antenna proximity coupling 139
C.6 Uncertainty contribution due to the ground plane reflection 141
C.6.1 Coupling to image in ground plane 141
C.6.2 Correction factors $\Delta F_{a,SSM}$ for F_a of biconical antenna 146
C.7 Uncertainty contribution due to the antenna radiation pattern 147
C.7.1 General 147
C.7.2 Biconical antennas 148
C.7.3 LPDA antennas 148
C.7.4 Hybrid antennas 149
C.7.5 Horn and LPDA antennas from 1 GHz to 18 GHz 150
Annex D (informative) Background information and rationale for calibration of antennas at frequencies above 1 GHz 153
D.1 Mismatch uncertainty 153
D.2 Mutual coupling between antennas and chamber reflection 153
D.3 Antenna separation distance and phase centre 153
D.4 Example gain of DRH at 1 m distance 155
Annex E (informative) Notes for measurement uncertainty budgets 157
E.1 General 157
E.2 Notes for measurement uncertainty budgets 157

Annex F (informative) Mismatch uncertainties from a two-port device connected between a transmit port and a receive port 167
Annex G (informative) Verification method for calibration of monopole antennas and uncertainty analysis of the ECSM 169
G.1 Verification method for calibration of monopole antennas by the plane wave method from 5 MHz to 30 MHz 169
G.1.1 Calibration procedure 169
G.1.2 Uncertainty evaluation for the calibration of monopole antennas by the plane wave method 170
G.2 Uncertainty analysis of the ECSM 170
G.2.1 Effect of rod length longer than $\lambda/8$ 170
G.2.2 Effect on AF of monopole antenna mounted on a tripod 172
G.2.3 Monopole antenna receiving an electric field 173
G.2.4 Equivalent capacitance substitution method (ECSM) 173
G.2.5 Uncertainties associated with the ECSM 175
G.2.6 An alternative to the dummy antenna, for which $F_{ac} = V_D - V_L$ 177
Annex H (informative) Helmholtz coil method for calibration of loop antennas up to 150 kHz 178
H.1 Measurement procedure 178
H.2 Uncertainties 180
Annex I (normative) Antenna pattern measurement method in the frequency range above 1 GHz, with measurement uncertainty budget 182
I.1 General 182
I.2 Test set-up 182
I.3 Test method 184
I.4 Test report 187
I.5 Uncertainty budget 187
Annex J (informative) Monte Carlo simulation of TAM loop antenna calibration measurement uncertainty – Example source code 189
Bibliography 192

Figure 1 – Set-up for AF determination using a network analyzer 30
Figure 2 – Set-up for AF determination using a measuring receiver and signal generator 30
Figure 3 – Example of mounting a capacitor in the dummy antenna 31
Figure 4 – Block diagram of TEM cell set-up for passive loop antennas 35
Figure 5 – Block diagram of TEM cell set-up for active loop antennas 36
Figure 21 – Loop antenna pair arrangements for the TAM 41
Figure 22 – Accuracy of Greene's formula and integral formula vs. frequency for r_i = 0,05 m, r_j = 0,3 m, and d = 0,39 m 42
Figure 23 – Examples of influence of ground plane on SIL in free-space condition 43
Figure 24 – Definitions of the parameters used in measurement uncertainty evaluation for $K(i,j)$ 45
Figure 25 – Antenna arrangement for the current probe method (CPM) 47
Figure 26 – Antenna arrangement for the standard antenna method 51
Figure 6 – Example of resonant spike due to poor biconical element connections, using 2 MHz increment 53
Figure 7 – Antenna set-up for SIL measurement at a free-space calibration site 61

Figure 8 – Antenna set-up for SIL and SA measurement at a ground-plane calibration site 61
Figure 9 – Antenna set-up for the TAM at a free-space calibration site 66
Figure 10 – Antenna set-up for the TAM at a calibration site with a metal ground plane 69
Figure 11 – Antenna set-up for the SSM 71
Figure 12 – Antenna set-up for the SAM at a calibration site with a metal ground plane 73
Figure 13 – Separation distance relative to the phase centre of an LPDA antenna 76
Figure 14 – LPDA antenna with a tapered curved geometry 78
Figure 15 – Separation distance with respect to the phase centre of horn antennas (see [49] for details) 79
Figure 16 – Schematic of a DRH showing relative locations of field point and phase centre of the DRH 80
Figure 17 – Biconical antenna set-up for SAM using vertical polarization, showing the paired monocone antenna and an example collapsible-element biconical AUC 93
Figure 18 – Test set-up for the calibration of LPDA and hybrid antennas positioned at a large height 96
Figure 19 – Set-up for LPDA antennas above absorber 98
Figure 20 – Set-up for transmission measurements using a network analyzer 100
Figure A.1 – Illustration of the angles of the electromagnetic rays subtended from the scanned LPDA antenna to the fixed height LPDA antenna and to the ground plane 111
Figure A.2 – F_a of biconical antenna with 200 Ω balun measured by the VP method of 9.3, and by the SSM method of 8.4 without correction 112
Figure A.3 – F_a of biconical antenna with 200 Ω balun measured by the VP method of 9.3, and by the SSM method of 8.4 with correction 112
Figure A.4 – Separation distance relative to the phase centre of an LPDA antenna 114
Figure A.5 – Statistical properties of multiple S_{21} sweeps (minimum, maximum, and mean value) 116
Figure A.6 – Standard deviation of S_{21} 116
Figure A.7 – Normalized standard deviation of S_{21} 117
Figure C.1 – Simplified model of a receive antenna 132
Figure C.2 – Insertion loss measurement for antenna calibration at a free-space calibration site 134
Figure C.3 – Insertion loss measurement for antenna calibration at a calibration site with a metal ground plane 136
Figure C.4 – Comparison of field strength given by Equation (C.17) versus in near-field region given by Equation (C.31) 139
Figure C.5 – Theoretical calculations of proximity coupling effects on the AF from the TAM (free-space conditions) 141
Figure C.6 – Deviation of AF from free-space value, F_a, caused by mutual coupling to the image in a metal ground plane (theoretical results) 143
Figure C.7 – Variation of $F_a(h,\mathrm{H})$ of biconical antenna with 50 Ω balun, 30 MHz to 320 MHz at heights every 0,5 m above a ground plane from 1 m to 4 m 144
Figure C.8 – AF of Figure C.7 normalized to free-space AF 144
Figure C.9 – Variation of $F_a(h,\mathrm{H})$ of biconical antenna with 200 Ω balun, 30 MHz to 320 MHz at heights every 0,5 m above a ground plane from 1 m to 4 m 145
Figure C.10 – Diagram of one triangular section of a biconical antenna element 147
Figure C.11 – Examples of radiation patterns (relative realized gain) of two example biconical antennas compared to ideal half-wave tuned dipole antenna 148

Figure C.12 – Examples of radiation patterns (relative realized gain) of three example LPDA antennas, compared to ideal half-wave tuned dipole antenna 149
Figure C.13 – Examples of radiation patterns (relative realized gain) of an example hybrid antenna, compared to ideal half-wave tuned dipole antenna 150
Figure C.14 – Example radiation patterns for classical DRH antenna 151
Figure C.15 – Example radiation patterns for novel DRH antenna 151
Figure C.16 – Example radiation patterns for classical LPDA antenna 152
Figure C.17 – Example radiation patterns for V-type LPDA antenna 152
Figure D.1 – Relative phase centres of a DRH antenna and an LPDA antenna 154
Figure D.2 – A transmission system between a horn antenna and an LPDA antenna 155
Figure D.3 – Measured AFs of a DRH antenna at 4,5 GHz 155
Figure D.4 – Graph showing the realized gain at 1 m for a DRH antenna 156
Figure E.1 – Comparison of measured and predicted SIL for calculable dipole antenna – 60 MHz element 160
Figure E.2 – Comparison of measured and predicted SIL for calculable dipole antenna – 180 MHz element 161
Figure E.3 – Reflectivity of chamber absorbing materials 165
Figure E.4 – Laser alignment system 165
Figure F.1 – Flow graph representation of a two-port device between a transmit port and a receiver port 167
Figure F.2 – Signal flow reduction 167
Figure G.1 – Diagram showing how the brass rod connects to the type N male bulkhead connector 170
Figure G.2 – Graph of the magnitude of the tan(…) ratio term in Equation (4) of 5.1.2.2 171
Figure G.3 – Graphical presentation of Equation (4) of 5.1.2.2 self-capacitance C_a of a 1 m monopole 171
Figure G.4 – Graphical presentation of Equation (5) of 5.1.2.2 height correction factor L_h 172
Figure G.5 – Calibration set-up consisting of a biconical and a loop antenna, and an elevated monopole antenna with vertical feed wires 173
Figure G.6 – Equivalent circuit representation for a monopole antenna system 173
Figure G.7 – Monopole antenna calibration using the ECSM 174
Figure G.8 – Equivalent circuit representation for the ECSM 174
Figure G.9 – Simplified circuit representation for Figure G.8 175
Figure G.10 – Circuit for dummy antenna simulating the effects of the antenna effective height, h_e 177
Figure H.1 – Diagram of Helmholtz coil method set-up 178
Figure H.2 – Variation of H/I across the central plane between the coils 180
Figure I.1 – Typical set-up for antenna pattern measurement 183
Figure I.2 − Definition of d_1 183
Figure I.3 − Definition of d_2 184
Figure I.4 − With d_1 held constant, d_2 is increased in x cm steps 185
Figure I.5 − With d_2 held constant, d_1 is increased in x cm steps 185
Figure I.6 − Distance and angle correction 187

Table 1 – Summary of calibration methods above 30 MHz for F_a 25

Table 2 – Calibration methods above 30 MHz by subclause number 26
Table 3 – Frequency increments for monopole antenna calibration 27
Table 4 – Example measurement uncertainty budget for F_{ac} of a monopole antenna calibrated by the ECSM using Equation (9) 33
Table 5 –Example measurement uncertainty budget for F_{aH} of a loop antenna measured in a TEM cell 37
Table 15 – Examples for valid use of Equation (65) 41
Table 16 – Example of an uncertainty budget for site insertion loss $A_i(i,j)$ 45
Table 17 – Example of an uncertainty budget for $K(i,j)$ as used by the TAM 46
Table 18 – Example of an uncertainty budget for F_{aH} of a loop antenna determined by the TAM – expanded uncertainty at 30 MHz 46
Table 19 – Example of an uncertainty budget for F_{aH} of a loop antenna determined by the current probe method – expanded uncertainty at 30 MHz 49
Table 20 – Example of an uncertainty budget for transfer impedance $|Z|$ according to the jig method of CISPR 16-1-2 50
Table 21 – Example of an uncertainty budget for F_{aH}(AUC) of a loop antenna determined by the standard antenna method – expanded uncertainty at 30 MHz 51
Table 6 – Frequency increments for broadband antenna calibration 52
Table 7 – Example measurement uncertainty budget for common components of a SIL measurement result evaluated from Equation (20) 62
Table 8 – Parameters used to determine phase centres of segments A and B 78
Table 9 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a horizontally-polarized biconical antenna measured by the SSM 87
Table 10 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a biconical antenna measured by the SAM in a FAR over the frequency range 30 MHz to 300 MHz 90
Table 11 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a tuned dipole antenna obtained by the SAM in a FAR at a free-space calibration site, using a calculable tuned dipole as the STA in the frequency range above 60 MHz 91
Table 12 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a biconical antenna measured using the SAM for vertical polarization over the frequency range 30 MHz to 300 MHz 94
Table 13 – Example measurement uncertainty budget for F_a of LPDA and hybrid antennas measured by the TAM at 4 m height for the frequency range 200 MHz to 3 GHz 97
Table 14 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a horn antenna measured by the TAM above 1 GHz for 3 m separation in free space 101
Table A.1 – Example type N male and female connector pin depths and tolerances using a type N pin-depth gauge 117
Table A.2 – Typical type N adaptor characteristics 118
Table B.1 – Antenna set-up for the SAM for tuned dipole antennas with averaging of $F_a(h,\mathrm{H})$ 122
Table B.2 – Antenna set-up for the SAM for biconical antennas with averaging of $F_a(h,\mathrm{H})$ 123
Table B.3 – Example measurement uncertainty budget for $F_a(h,\mathrm{H})$ of a biconical antenna measured by the SAM over the frequency range 30 MHz to 300 MHz 123
Table B.4 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a biconical antenna obtained by the SAM with averaging of $F_a(h,\mathrm{H})$ in the frequency range below 300 MHz 125
Table B.5 – Example measurement uncertainty budget for $F_a(h,\mathrm{H})$ of a biconical antenna obtained by the TAM with the antenna set-up specified in Table B.2 126

Table B.6 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a biconical antenna obtained by the TAM with averaging of $F_a(h,\mathrm{H})$ in the frequency range below 300 MHz 126

Table B.7 – Antenna set-ups for the SAM for determining F_a of tuned dipole antennas at specific frequencies in the range 30 MHz to 1 000 MHz 128

Table B.8 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a tuned dipole antenna obtained by the SAM using the antenna set-ups specified in Table B.7 129

Table B.9 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a tuned dipole antenna obtained by the TAM using the antenna set-ups specified in Table B.7 130

Table C.1 – Examples of the antenna height range h for horizontal polarization for an error ≤ 0,3 dB 145

Table C.2 – Correction factors $\Delta F_{a,SSM}$ to convert AF measured by SSM to F_a 146

Table C.3 – Mechanical dimensions for the biconical antenna [52] 147

Table G.1 – Example measurement uncertainty budget for F_a of a monopole antenna measured by the SAM 170

Table H.1 – Example measurement uncertainty budget for F_{aH} of a loop antenna measured by the Helmholtz coil method for the frequency range 50 kHz to 150 kHz 181

Table I.1 – Correction of angle α for a distance of d_1 = 3 m (refer to Figure I.6) 186

Table I.2 – Example measurement uncertainty budget for antenna pattern measurement above 1 GHz 188

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE

_____

SPECIFICATION FOR RADIO DISTURBANCE AND IMMUNITY MEASURING APPARATUS AND METHODS –

Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – EMC antenna calibration

FOREWORD

1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This consolidated version of the official IEC Standard and its amendments has been prepared for user convenience.

CISPR 16-1-6 edition 1.2 contains the first edition (2014-12) [documents CISPR/A/1087/FDIS and CISPR/A/1098/RVD], its amendment 1 (2017-01) [documents CISPR/A/1195/FDIS and CISPR/A/1204/RVD] and its amendment 2 (2022-03) [documents CIS/A/1362/FDIS and CIS/A/1365/RVD].

This Final version does not show where the technical content is modified by amendments 1 and 2. A separate Redline version with all changes highlighted is available in this publication.

International Standard CISPR 16-1-6 has been prepared by CISPR subcommittee A: Radio-interference measurements and statistical methods.

It has the status of a basic EMC Standard in accordance with IEC Guide 107, *Electromagnetic compatibility – Guide to the drafting of electromagnetic compatibility publications.*

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts of CISPR 16 series, under the general title *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendments will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "http://webstore.iec.ch" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

SPECIFICATION FOR RADIO DISTURBANCE AND IMMUNITY MEASURING APPARATUS AND METHODS –

Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – EMC antenna calibration

1 Scope

This part of CISPR 16 provides procedures and supporting information for the calibration of antennas for determining antenna factors (AF) that are applicable to antennas intended for use in radiated disturbance measurements.

It has the status of a basic EMC Standard in accordance with IEC Guide 107, *Electromagnetic compatibility – Guide to the drafting of electromagnetic compatibility publications.*

The AF of an antenna is influenced by nearby surroundings and by its position in space relative to the radiating source. This standard focuses on antenna calibrations that provide the AF in a free-space environment in the direction of the boresight of the antenna. The frequency range addressed is 9 kHz to 18 GHz. The relevant antenna types covered in this standard are monopole, loop, dipole, biconical, log-periodic dipole-array (LPDA), hybrid and horn antennas.

Guidance is also provided on measurement uncertainties associated with each calibration method and configuration, and the test instrumentation used.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

CISPR 16-1-2, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Coupling devices for conducted disturbance measurements*

CISPR 16-1-4:2019, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antennas and test sites for radiated disturbance measurements*

CISPR 16-1-5:2014, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antenna calibration sites and reference test sites for 5 MHz to 18 GHz*

IEC 60050-161, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 208
1 Domaine d'application 210
2 Références normatives 210
3 Termes, définitions et abréviations 211
3.1 Termes et définitions 211
3.1.1 Termes relatifs aux antennes 211
3.1.2 Termes relatifs au facteur d'antenne 215
3.1.3 Termes relatifs à l'emplacement de mesure 216
3.1.4 Autres termes 217
3.2 Abréviations 218
4 Concepts fondamentaux 219
4.1 Généralités 219
4.2 Concept de facteur d'antenne 219
4.3 Méthodes d'étalonnage pour des fréquences de 30 MHz et plus 220
4.3.1 Généralités 220
4.3.2 Distances de séparation minimales des antennes 220
4.3.3 Considérations générales pour la méthode TAM 221
4.3.4 Considérations générales pour la méthode SSM 221
4.3.5 Considérations générales pour la méthode SAM 221
4.4 Incertitudes de mesure pour les résultats des mesurages d'étalonnage des antennes 222
4.5 Synthèse des méthodes de mesure permettant d'obtenir l'AF 222
5 Méthodes d'étalonnage pour la gamme de fréquences comprise entre 9 kHz et 30 MHz 225
5.1 Étalonnage des antennes monopôles 225
5.1.1 Généralités 225
5.1.2 Étalonnage par la méthode ECSM 226
5.2 Étalonnage des antennes boucles 233
5.2.1 Généralités 233
5.2.2 Méthode des cellules TEM (Crawford) 234
5.2.3 Méthode à trois antennes (TAM) 238
5.2.4 Méthode de la sonde de courant (CPM) 248
5.2.5 Méthode de l'antenne étalon 251
6 Fréquences, matériel et vérifications de fonctionnement pour des étalonnages à des fréquences supérieures ou égales à 30 MHz 253
6.1 Fréquences d'étalonnage 253
6.1.1 Gammes et pas de fréquences d'étalonnage 253
6.1.2 Fréquence de transition pour les antennes hybrides 254
6.2 Exigences concernant les instruments de mesure pour les étalonnages d'antennes 255
6.2.1 Types de matériel 255
6.2.2 Désadaptation 257
6.2.3 Dynamique et reproductibilité de mesurage de SIL 258
6.2.4 Rapport signal/bruit 259
6.2.5 Mâts et câbles d'antennes 259
6.3 Vérifications de fonctionnement d'une AUC 260

6.3.1 Généralités 260
6.3.2 Équilibre d'une antenne 260
6.3.3 Caractéristique de polarisation croisée d'une antenne 260
6.3.4 Diagrammes de rayonnement d'une antenne 261
7 Paramètres et équations de base communs aux méthodes d'étalonnage d'antennes pour des fréquences au-delà de 30 MHz 262
7.1 Synthèse des méthodes de mesure permettant d'obtenir l'AF 262
7.2 Mesurages de la perte d'insertion de l'emplacement 262
7.2.1 Généralités 262
7.2.2 Méthode de mesure de SIL et de SA 262
7.2.3 Composantes d'incertitude communes d'un mesurage de SIL 264
7.3 Équations de base pour le calcul de l'AF à partir des mesurages de SIL et de SA 266
7.3.1 Facteur d'antenne issu des mesurages de SIL 266
7.3.2 Relation entre AF et SIL pour un emplacement d'étalonnage en espace libre 266
7.3.3 Relation entre AF et SIL pour un emplacement d'étalonnage avec un plan de masse de référence métallique 267
7.4 Équations pour le facteur AF et les incertitudes de mesure avec les méthodes TAM, SSM et SAM 268
7.4.1 Méthode TAM 268
7.4.2 SSM 273
7.4.3 Méthode SAM 276
7.5 Paramètres de spécification du centre de phase et de la position des antennes 278
7.5.1 Généralités 278
7.5.2 Position de référence et centres de phase des antennes LPDA et hybrides 279
7.5.3 Centres de phase des antennes cornets 282
8 Détails pour les méthodes d'étalonnage TAM, SAM et SSM pour des fréquences de 30 MHz et plus 284
8.1 Généralités 284
8.2 Considérations concernant les étalonnages F_a à l'aide de la méthode TAM 284
8.2.1 Considérations générales 284
8.2.2 Considérations concernant l'emplacement d'étalonnage et le montage d'antennes pour une utilisation avec la méthode TAM 285
8.2.3 Paramètres d'antennes pour un environnement en espace libre ou un emplacement sur plan de masse de référence 286
8.2.4 Validation de la méthode d'étalonnage 287
8.3 Considérations concernant les étalonnages F_a à l'aide de la méthode SAM 288
8.3.1 Considérations générales et emplacement d'étalonnage pour une utilisation de la méthode SAM 288
8.3.2 Méthodes d'étalonnage et montages d'antennes pour le facteur F_a par la méthode SAM 289
8.3.3 Paramètres de la STA 290
8.4 Étalonnages SSM avec un emplacement sur plan de masse de référence, à des fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz 291
8.4.1 Considérations générales et emplacement d'étalonnage pour la méthode SSM 291
8.4.2 Méthode d'étalonnage pour la SSM 291
8.4.3 Calcul de F_a 292
8.4.4 Incertitudes du facteur F_a obtenu avec la méthode SSM 292

9 Méthodes d'étalonnage pour des types d'antenne spécifiques pour des fréquences de 30 MHz et plus 293
9.1 Généralités 293
9.2 Étalonnages des antennes biconiques et hybrides dans un environnement en espace libre pour des fréquences comprises entre 30 MHz et 300 MHz et des doublets accordés pour des fréquences comprises entre 60 MHz et 1 000 MHz 293
9.2.1 Considérations générales et exigences concernant l'emplacement d'étalonnage 293
9.2.2 Méthode d'étalonnage et montage d'antennes pour une utilisation avec la méthode SAM 294
9.2.3 Incertitudes de F_a déterminées par la méthode SAM 295
9.2.4 Montage d'antennes à utiliser avec la méthode TAM (variante) 297
9.3 Étalonnage des antennes biconiques (30 MHz à 300 MHz) et hybrides, à l'aide des méthodes SAM et VP avec un emplacement sur plan de masse de référence 298
9.3.1 Considérations générales et exigences concernant l'emplacement d'étalonnage 298
9.3.2 Méthode d'étalonnage et montage d'antennes 298
9.3.3 Incertitudes de F_a déterminées par la méthode SAM 299
9.4 Étalonnage des antennes LPDA, hybrides et cornets dans un environnement en espace libre, pour des fréquences comprises entre 200 MHz et 18 GHz 301
9.4.1 Considérations générales et emplacement d'étalonnage pour un environnement en espace libre 301
9.4.2 Étalonnages utilisant la méthode TAM 302
9.4.3 Montage d'antennes à utiliser avec la méthode SAM 304
9.4.4 Autre montage d'antennes pour un emplacement comportant un matériau absorbant sur le sol 304
9.5 Étalonnage des antennes cornets et LPDA dans une FAR, pour des fréquences comprises entre 1 GHz et 18 GHz 305
9.5.1 Étalonnage utilisant la méthode TAM 305
9.5.2 Étalonnage et montage d'antennes pour la méthode SAM 309
Annexe A (informative) Historique et justifications des méthodes d'étalonnage des antennes 310
A.1 Justifications de la nécessité de plusieurs méthodes d'étalonnage et de l'utilisation d'un emplacement sur plan de masse de référence 310
A.2 Mesures spéciales propres à l'étalonnage des antennes omnidirectionnelles 312
A.2.1 Généralités 312
A.2.2 Difficultés d'étalonnage des antennes omnidirectionnelles 312
A.2.3 Réduction au minimum des réflexions des supports d'antennes et du rayonnement des câbles 312
A.2.4 Conicité de champ et montage d'antennes monocônes pour l'étalonnage des antennes biconiques à polarisation verticale 314
A.2.5 Utilisation de la HP ou de la VP dans une FAR 314
A.2.6 Situation de remplacement où les modèles de STA et d'AUC sont identiques 315
A.3 Étalonnages avec des antennes doublets calculables à large bande 315
A.3.1 Inconvénients des antennes doublets accordées 315
A.3.2 Avantages des antennes doublets calculables à large bande 316
A.3.3 Inconvénients des antennes doublets calculables 316
A.4 Justifications pour le facteur F_a et fréquence de transition entre les antennes biconiques et LPDA 316
A.4.1 Justifications pour le facteur F_a 316

A.4.2 Fréquence de transition entre les antennes biconiques et les antennes LPDA 317
A.4.3 Types d'éléments biconiques 318
A.5 Sources d'incertitude de mesure plus grande du facteur F_a avec la méthode SSM 318
A.6 Étalonnage des antennes LPDA en utilisant des distances de séparation réduites 322
A.6.1 Étalonnage des antennes LPDA en utilisant des distances de séparation réduites 322
A.6.2 Correction de l'intensité de champ électrique afin de tenir compte du centre de phase des antennes LPDA 322
A.7 Discrimination de polarisation croisée des antennes LPDA 323
A.8 Conseils pratiques pour l'instrumentation de mesure 324
A.8.1 Rapport signal/bruit 324
A.8.2 Profondeur des broches de connecteurs 327
A.8.3 Influence de l'adaptateur ajouté dans un mesurage "sur câbles traversants" 327
A.8.4 Niveau de compression 327
A.8.5 Fonction de pente de la puissance source au-delà d'une fréquence de 6 GHz 328
A.8.6 Pas de fréquence pour la détection des résonances 328
A.8.7 Affaiblissement de réflexion ou ROS 328
A.9 Considérations relatives à l'incertitude 329
A.9.1 Généralités 329
A.9.2 Incertitudes réalisables pour le facteur F_a 329
A.9.3 Incertitudes des doublets au-dessus d'un plan de masse de référence 329
A.9.4 Vérification de l'incertitude par comparaison des méthodes 330
Annexe B (normative) Étalonnage des antennes biconiques et des antennes doublets accordées au-dessus d'un plan de masse de référence en utilisant les méthodes TAM et SAM 331
B.1 Généralités 331
B.2 Caractéristiques des antennes biconiques et des antennes doublets 331
B.3 Fréquences 332
B.4 Mesurage du facteur $F_a(h,p)$ des antennes biconiques et doublets accordées et déduction de F_a par calcul de la moyenne de $F_a(h,p)$ pour des fréquences comprises entre 30 MHz et 300 MHz 332
B.4.1 Généralités 332
B.4.2 Mesurage de $F_a(h,\mathrm{H})$ par la méthode SAM et déduction de F_a 332
B.4.3 Mesurage de $F_a(h,\mathrm{H})$ par la méthode TAM et déduction de F_a 336
B.5 Mesurage du facteur F_a des doublets accordés placés au-dessus d'un plan de masse de référence dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 1 000 MHz 338
B.5.1 Généralités 338
B.5.2 Mesurage de F_a par la méthode SAM 338
B.5.3 Mesurage de F_a par la méthode TAM 340
Annexe C (informative) Justifications relatives aux équations utilisées dans l'étalonnage des antennes et informations pertinentes concernant les caractéristiques d'antennes pour l'analyse d'incertitude dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 1 GHz 342
C.1 Généralités 342
C.2 Facteur d'antenne et gain d'antenne 342

C.2.1 Relation entre l'AF et le gain pour les antennes dans un environnement en espace libre 342
C.2.2 Relation entre l'AF et le gain pour les antennes monopôles sur un plan de masse de référence de grande surface 344
C.3 Équations pour la perte d'insertion entre les antennes 345
C.3.1 Perte d'insertion d'emplacement mesurée à un emplacement d'étalonnage en espace libre 345
C.3.2 Perte d'insertion d'emplacement mesurée à un emplacement sur plan de masse de référence métallique 347
C.3.3 Affaiblissement de l'emplacement mesuré avec un emplacement sur plan de masse de référence métallique 349
C.4 Contribution à l'incertitude due aux effets de champ proche 350
C.5 Contribution à l'incertitude due au couplage de proximité des antennes 351
C.6 Contribution à l'incertitude due à la réflexion sur le plan de masse de référence 353
C.6.1 Couplage avec la représentation sur le plan de masse de référence 353
C.6.2 Facteurs de correction $\Delta F_{a,SSM}$ pour le facteur F_a d'une antenne biconique 359
C.7 Contribution à l'incertitude due au diagramme de rayonnement des antennes 361
C.7.1 Généralités 361
C.7.2 Antennes biconiques 362
C.7.3 Antennes LPDA 363
C.7.4 Antennes hybrides 363
C.7.5 Antennes cornets et LPDA pour des fréquences comprises entre 1 GHz et 18 GHz 364
Annexe D (informative) Historique et justifications pour l'étalonnage des antennes à des fréquences au-delà de 1 GHz 369
D.1 Incertitude de désadaptation 369
D.2 Couplage mutuel entre les antennes et réflexion dans la chambre 369
D.3 Distance de séparation des antennes et centre de phase 370
D.4 Exemple de gain d'une antenne DRH à une distance de 1 m 372
Annexe E (informative) Notes relatives aux budgets d'incertitude de mesure 374
E.1 Généralités 374
E.2 Notes pour les budgets d'incertitude de mesure 374
Annexe F (informative) Incertitudes de désadaptation dues à un dispositif à deux ports connecté entre un port d'émission et un port de réception 385
Annexe G (informative) Méthode de vérification pour l'étalonnage des antennes monopôles et analyse d'incertitude de la méthode ECSM 387
G.1 Méthode de vérification pour l'étalonnage des antennes monopôles par la méthode des ondes planes dans une gamme de fréquences de 5 MHz à 30 MHz 387
G.1.1 Méthode d'étalonnage 387
G.1.2 Évaluation d'incertitude pour l'étalonnage d'antennes monopôles par la méthode des ondes planes 388
G.2 Analyse d'incertitude de l'ESCM 389
G.2.1 Effet d'une longueur de fouet de plus de $\lambda/8$ 389
G.2.2 Effet sur le facteur AF d'une antenne monopôle montée sur un trépied 391
G.2.3 Antenne monopôle recevant un champ électrique 392
G.2.4 Méthode ECSM 393
G.2.5 Incertitudes associées à la méthode ECSM 395
G.2.6 Variante à l'antenne fictive pour laquelle $F_{ac} = V_D - V_L$ 397

Annexe H (informative) Méthode de la bobine d'Helmholtz pour l'étalonnage d'antennes boucles jusqu'à une fréquence de 150 kHz 399
H.1 Méthode de mesure 399
H.2 Incertitudes 402
Annexe I (normative) Méthode de mesure du diagramme de rayonnement d'une antenne dans la plage de fréquences supérieure à 1 GHz, avec budget de l'incertitude de mesure 403
I.1 Généralités 403
I.2 Montage d'essai 404
I.3 Méthode d'essai 406
I.4 Rapport d'essai 409
I.5 Budget d'incertitude 409
Annexe J (informative) Simulation de Monte-Carlo de l'incertitude de mesure d'étalonnage d'une antenne boucle TAM – Exemple de code source 411
Bibliographie 414

Figure 1 – Montage pour la détermination du facteur AF au moyen d'un analyseur de réseau 229
Figure 2 – Montage pour la détermination du facteur AF au moyen d'un récepteur de mesure et d'un générateur de signaux 230
Figure 3 – Exemple de montage d'un condensateur dans l'antenne fictive 231
Figure 4 – Schéma de principe d'un montage à cellules TEM pour antennes boucles passives 236
Figure 5 – Schéma de principe d'un montage à cellules TEM pour antennes boucles actives 237
Figure 21 – Dispositions de paires d'antennes boucles pour la méthode des trois antennes 242
Figure 22 – Exactitude de la formule de Greene et de la formule intégrale par rapport à la fréquence pour r_i = 0,05 m, r_j = 0,3 m, et d = 0,39 m 243
Figure 23 – Exemples de l'influence du plan de masse sur la SIL en condition d'espace libre 244
Figure 24 – Définitions des paramètres utilisés dans l'évaluation de l'incertitude de mesure pour $K(i,j)$ 246
Figure 25 – Disposition de l'antenne pour la méthode de la sonde de courant (CPM) 248
Figure 26 – Disposition de l'antenne pour la méthode de l'antenne étalon 252
Figure 6 – Exemple de pointe résonnante due à des connexions d'éléments biconiques inadaptées, avec pas de 2 MHz 254
Figure 7 – Montage d'antennes pour le mesurage de SIL à un emplacement d'étalonnage en espace libre 264
Figure 8 – Montage d'antennes pour le mesurage de SIL et de SA à un emplacement d'étalonnage sur plan de masse de référence 264
Figure 9 – Montage d'antennes pour la méthode TAM à un emplacement d'étalonnage en espace libre 269
Figure 10 – Montage d'antennes pour la méthode TAM sur un emplacement d'étalonnage avec plan de masse de référence métallique 272
Figure 11 – Montage d'antennes pour la méthode SSM 274
Figure 12 – Montage d'antennes pour la méthode SAM sur emplacement d'étalonnage avec un plan de masse de référence métallique 277
Figure 13 – Distance de séparation par rapport au centre de phase d'une antenne LPDA 280

Figure 14 – Antenne LPDA à géométrie conique courbe 282

Figure 15 – Distance de séparation par rapport au centre de phase des antennes cornets (voir détails en [49]) 283

Figure 16 – Représentation schématique d'une antenne DRH illustrant les emplacements relatifs du point de champ et du centre de phase de l'antenne 284

Figure 17 – Montage d'antennes biconiques pour la méthode SAM utilisant la polarisation verticale, et illustrant l'antenne monocône appariée ainsi qu'un exemple d'AUC biconique à éléments contractiles 299

Figure 18 – Montage d'essai pour l'étalonnage des antennes LPDA et hybrides positionnées à une hauteur élevée 302

Figure 19 – Montage pour antennes LPDA au-dessus d'un matériau absorbant 305

Figure 20 – Montage pour les mesurages d'émission au moyen d'un analyseur de réseau 307

Figure A.1 – Illustration des angles des rayons électromagnétiques sous-tendus entre l'antenne LPDA balayée, l'antenne LPDA à hauteur fixe et le plan de masse de référence 320

Figure A.2 – Facteur F_a d'une antenne biconique avec un symétriseur de 200 Ω, mesuré par la méthode VP de 9.3 et par la méthode SSM de 8.4 sans correction 321

Figure A.3 – Facteur F_a d'une antenne biconique avec un symétriseur de 200 Ω, mesuré par la méthode VP de 9.3 et par la méthode SSM de 8.4 avec correction 321

Figure A.4 – Distance de séparation par rapport au centre de phase d'une antenne LPDA 323

Figure A.5 – Propriétés statistiques de balayages S_{21} multiples (minimum, maximum et valeur moyenne) 325

Figure A.6 – Écart-type de S_{21} 326

Figure A.7 – Écart-type normalisé de S_{21} 326

Figure C.1 – Modèle simplifié d'une antenne de réception 343

Figure C.2 – Mesurage de la perte d'insertion pour l'étalonnage d'antennes à un emplacement d'étalonnage en espace libre 345

Figure C.3 – Mesurage de la perte d'insertion pour l'étalonnage d'antennes à un emplacement d'étalonnage avec plan de masse de référence métallique 347

Figure C.4 – Comparaison de l'intensité de champ donnée par l'Équation (C.17) avec celle de la région de champ proche donnée par l'Équation (C.31) 351

Figure C.5 – Calculs théoriques des effets du couplage de proximité sur le facteur AF obtenu par la méthode TAM (conditions en espace libre) 353

Figure C.6 – Écart de l'AF par rapport à la valeur en espace libre F_a dû au couplage mutuel avec la représentation dans un plan de masse de référence métallique (résultats théoriques) 355

Figure C.7 – Variation de $F_a(h,\mathrm{H})$ d'une antenne biconique avec un symétriseur de 50 Ω, et une gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 320 MHz à des hauteurs avec une distance de séparation de 0,5 m au-dessus d'un plan de masse de référence compris entre 1 m et 4 m 356

Figure C.8 – AF de la Figure C.7 normalisé à l'AF en espace libre 357

Figure C.9 – Variation de $F_a(h,\mathrm{H})$ d'une antenne biconique avec un symétriseur de 200 Ω, et une gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 320 MHz à des hauteurs avec une distance de séparation de 0,5 m au-dessus d'un plan de masse de référence compris entre 1 m et 4 m 358

Figure C.10 – Diagramme d'une section triangulaire d'élément d'antenne biconique 361

Figure C.11 – Exemples de diagrammes de rayonnement (gain relatif réalisé) de deux exemples d'antennes biconiques comparées à l'antenne doublet accordée demi-onde théorique 362

Figure C.12 – Exemples de diagrammes de rayonnement (gain relatif réalisé) de trois exemples d'antennes LPDA comparées à une antenne doublet accordée demi-onde théorique 363

Figure C.13 – Exemples de diagrammes de rayonnement (gain relatif réalisé) d'un exemple d'antenne hybride comparée à une antenne doublet accordée demi-onde théorique 364

Figure C.14 – Exemple de diagrammes de rayonnement pour une antenne DRH classique 365

Figure C.15 – Exemple de diagrammes de rayonnement pour une antenne DRH nouvelle 366

Figure C.16 – Exemple de diagrammes de rayonnement pour une antenne LPDA classique 367

Figure C.17 – Exemple de diagrammes de rayonnement pour une antenne LPDA de type V 368

Figure D.1 – Centres de phase relatifs d'une antenne DRH et d'une antenne LPDA 370

Figure D.2 – Système de transmission entre une antenne cornet et une antenne LPDA 371

Figure D.3 – Facteurs AF mesurés d'une antenne DRH à une fréquence de 4,5 GHz 372

Figure D.4 – Graphique illustrant le gain réalisé à une distance de 1 m pour une antenne DRH 373

Figure E.1 – Comparaison de SIL mesurée et de SIL prévue pour une antenne doublet calculable – élément à 60 MHz 377

Figure E.2 – Comparaison de SIL mesurée et de SIL prévue pour une antenne doublet calculable – élément à 180 MHz 378

Figure E.3 – Réflectivité des matériaux absorbants de la chambre 382

Figure E.4 – Système d'alignement laser 383

Figure F.1 – Schéma de fluence d'un dispositif à deux ports entre un port d'émission et un port de réception 385

Figure F.2 – Réduction de la fluence de signal 385

Figure G.1 – Diagramme illustrant la méthode de connexion du fouet en laiton au connecteur de cloison de type N mâle 388

Figure G.2 – Graphique de l'amplitude du terme du rapport tan(…) dans l'Équation (4) de 5.1.2.2 390

Figure G.3 – Représentation graphique de l'Équation (4) de 5.1.2.2, capacité propre C_a d'une antenne monopôle d'une longueur de 1 m 390

Figure G.4 – Représentation graphique de l'Équation (5) de 5.1.2.2 facteur de correction de la hauteur L_h 391

Figure G.5 – Montage d'étalonnage composé d'une antenne biconique, d'une antenne boucle et d'une antenne monopôle élevée avec des câbles d'alimentation verticaux 392

Figure G.6 – Représentation de circuit équivalent pour un système d'antennes monopôles 393

Figure G.7 – Etalonnage de l'antenne monopôle à l'aide de la méthode ECSM 394

Figure G.8 – Représentation de circuit équivalent pour la méthode ECSM 394

Figure G.9 – Représentation de circuit simplifiée pour la Figure G.8 395

Figure G.10 – Circuit pour antenne fictive avec simulation des effets de la hauteur d'antenne effective h_e 398

Figure H.1 – Schéma de montage de la méthode de la bobine d'Helmholtz 399

Figure H.2 – Variation de H/I dans le plan central entre les bobines 401

Figure I.1 – Montage d'essai classique pour le mesurage du diagramme de rayonnement d'une antenne 404

Figure I.2 – Définition de d_1 405
Figure I.3 – Définition de d_2 405
Figure I.4 – Avec une distance d_1 fixe, d_2 est augmentée par pas de x cm 406
Figure I.5 – Avec une distance d_2 fixe, d_1 est augmentée par pas de x cm 407
Figure I.6 – Correction d'angle et de distance 408

Tableau 1 – Synthèse des méthodes d'étalonnage au-delà d'une fréquence de 30 MHz pour F_a 223
Tableau 2 – Méthodes d'étalonnage au-delà d'une fréquence de 30 MHz par numéro de paragraphe 224
Tableau 3 – Pas de fréquences pour l'étalonnage des antennes monopôles 225
Tableau 4 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le F_{ac} d'une antenne monopôle étalonnée par la méthode ECSM à l'aide de l'Équation (9) 233
Tableau 5 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour F_{aH} d'une antenne boucle mesuré dans une cellule TEM 238
Tableau 15 – Exemples d'utilisation valable de l'Équation (65) 242
Tableau 16 – Exemple de budget d'incertitude pour la perte d'insertion de l'emplacement $A_i(i,j)$ 246
Tableau 17 – Exemple de budget d'incertitude pour $K(i,j)$ utilisé par la méthode TAM 247
Tableau 18 – Exemple de budget d'incertitude pour F_{aH} d'une antenne boucle, déterminé par la méthode à trois antennes (TAM) – incertitude élargie à 30 MHz 247
Tableau 19 – Exemple de budget d'incertitude pour F_{aH} d'une antenne boucle, déterminé par la méthode de la sonde de courant – incertitude élargie à 30 MHz 251
Tableau 20 – Exemple de budget d'incertitude pour l'impédance de transfert $|Z|$ selon la méthode du gabarit-support de la CISPR 16-1-2 251
Tableau 21 – Exemple de budget d'incertitude pour F_{aH}(AUC) d'une antenne boucle, déterminé par la méthode de l'antenne étalon – incertitude élargie à 30 MHz 253
Tableau 6 – Pas de fréquence pour l'étalonnage d'antennes à large bande 253
Tableau 7 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour les composantes communes d'un résultat de mesure de SIL évalué à partir de l'Équation (20) 266
Tableau 8 – Paramètres utilisés pour déterminer les centres de phase des segments A et B 282
Tableau 9 – Exemple de budget d'incertitude de mesure de F_a pour une antenne biconique à polarisation horizontale, mesuré par la méthode SSM 293
Tableau 10 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a d'une antenne biconique mesuré par la méthode SAM dans une FAR dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 300 MHz 296
Tableau 11 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a d'une antenne doublet accordée obtenu par la méthode SAM dans une FAR sur un emplacement d'étalonnage en espace libre, en utilisant un doublet accordé calculable comme STA dans la gamme de fréquences au-delà de 60 MHz 297
Tableau 12 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a d'une antenne biconique, mesuré en utilisant la méthode SAM pour une polarisation verticale dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 300 MHz 300
Tableau 13 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a des antennes LPDA et hybrides, mesuré en utilisant la méthode TAM à une hauteur de 4 m pour la gamme de fréquences comprise entre 200 MHz et 3 GHz 303
Tableau 14 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_a d'une antenne cornet, mesuré par la méthode TAM au-delà d'une fréquence de 1 GHz pour une distance de séparation de 3 m en espace libre 309

Tableau A.1 – Exemple de profondeurs de broche de connecteurs mâle et femelle de type N et tolérances correspondantes avec un calibre de profondeur de broche de type N 327

Tableau A.2 – Caractéristiques types d'un adaptateur de type N 327

Tableau B.1 – Montage d'antennes pour la méthode SAM pour des antennes doublets accordées avec calcul de la moyenne de $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ 333

Tableau B.2 – Montage d'antennes pour la méthode SAM pour des antennes biconiques avec calcul de la moyenne de $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ 333

Tableau B.3 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ d'une antenne biconique, mesuré par la méthode SAM dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 300 MHz 334

Tableau B.4 – Exemple de budget d'incertitude de mesure de F_{a} d'une antenne biconique par la méthode SAM avec calcul de la moyenne de $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ dans la gamme de fréquences en dessous de 300 MHz 335

Tableau B.5 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du facteur $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ d'une antenne biconique, obtenu par la méthode TAM avec le montage d'antennes spécifié au Tableau B.2 337

Tableau B.6 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du F_{a} d'une antenne biconique, obtenu par la méthode TAM avec calcul de la moyenne de $F_{\mathrm{a}}(h,\mathrm{H})$ dans la gamme de fréquences en dessous de 300 MHz 338

Tableau B.7 – Montages d'antennes adaptés à la méthode SAM pour la détermination du facteur F_{a} des antennes doublets accordées à des fréquences spécifiques dans la gamme comprise entre 30 MHz et 1 000 MHz 339

Tableau B.8 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_{a} d'une antenne doublet accordée, obtenu par la méthode SAM, en utilisant les montages d'antennes spécifiés dans le Tableau B.7 340

Tableau B.9 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur F_{a} d'une antenne doublet accordée, obtenu par la méthode TAM, en utilisant les montages d'antennes spécifiés dans le Tableau B.7 341

Tableau C.1 – Exemples de plage de hauteurs d'antenne h pour une polarisation horizontale dans le cas d'une erreur ≤ 0,3 dB 359

Tableau C.2 – Facteurs de correction $\Delta F_{\mathrm{a,SSM}}$ qui permettent de convertir l'AF mesuré par la méthode SSM en facteur F_{a} 360

Tableau C.3 – Dimensions mécaniques pour l'antenne biconique [52] 361

Tableau G.1 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du F_{a} d'une antenne monopôle au moyen de la SAM 389

Tableau H.1 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du F_{aH} d'une antenne boucle, mesuré par la méthode de la bobine d'Helmholtz pour la gamme de fréquences comprise entre 50 kHz et 150 kHz 402

Tableau I.1 – Correction de l'angle α pour une distance d_1 = 3 m (voir Figure I.6) 408

Tableau I.2 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du diagramme de rayonnement d'une antenne au-dessus de 1 GHz 410

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES

_____

SPÉCIFICATIONS DES MÉTHODES ET DES APPAREILS DE MESURE DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES ET DE L'IMMUNITÉ AUX PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES –

Partie 1-6: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Étalonnage des antennes CEM

AVANT-PROPOS

1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

Cette version consolidée de la Norme IEC officielle et de ses amendements a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.

La CISPR 16-1-6 édition 1.2 contient la première édition (2014-12) [documents 65C/583/FDIS et 65C/589/RVD], son amendement 1 (2017-01) [documents 65C/684/FDIS et 65C/691/RVD] et son amendement 2 (2022-03) [documents CIS/A/1362/FDIS et CIS/A/1365/RVD].

Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par les amendements 1 et 2. Une version Redline montrant toutes les modifications est disponible dans cette publication.

La Norme internationale CISPR 16-1-6 a été établie par le sous-comité A du CISPR: Mesures des perturbations radioélectriques et méthodes statistiques.

Elle a le statut de Norme fondamentale en CEM en accord avec le Guide 107 de l'IEC, *Compatibilité électromagnétique – Guide pour la rédaction des publications sur la compatibilité électromagnétique*.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CISPR 16, publiées sous le titre général *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de ses amendements ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "http://webstore.iec.ch" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo *"colour inside"* qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

SPÉCIFICATIONS DES MÉTHODES ET DES APPAREILS DE MESURE DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES ET DE L'IMMUNITÉ AUX PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES –

Partie 1-6: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Étalonnage des antennes CEM

1 Domaine d'application

La présente partie de la CISPR 16 fournit des procédures et des informations à l'appui concernant l'étalonnage des antennes afin de déterminer les facteurs d'antenne (AF) applicables aux antennes destinées à être utilisées pour les mesurages des perturbations rayonnées.

Elle a le statut de Norme fondamentale en CEM en accord avec le Guide 107 de l'IEC, *Compatibilité électromagnétique – Guide pour la rédaction des publications sur la compatibilité électromagnétique.*

Le facteur d'antenne est influencé par l'environnement immédiat et par sa position dans l'espace par rapport à la source de rayonnement. La présente norme se concentre sur les étalonnages d'antennes qui fournissent l'AF dans un environnement en espace libre dans l'axe de visée de l'antenne. La gamme de fréquences traitée est comprise entre 9 kHz et 18 GHz. Les types d'antenne appropriés couverts dans la présente norme sont les suivants: antennes monopôles, boucles, doublets, biconiques, log-périodiques à doublet (LPDA), hybrides et cornets.

Des lignes directrices sont également fournies concernant les incertitudes de mesure associées à chaque méthode et à chaque configuration d'étalonnage, ainsi qu'à l'instrumentation d'essai utilisée.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CISPR 16-1-2, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-2: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Dispositifs de couplage pour la mesure des perturbations conduites*

CISPR 16-1-4:2019, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-4: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Antennes et emplacements d'essai pour les mesures des perturbations rayonnées*

CISPR 16-1-5:2014, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-5: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations*

radioélectriques – Emplacements d'étalonnage d'antenne et emplacements d'essai de référence pour la plage comprise entre 5 MHz et 18 GHz

IEC 60050-161, *Vocabulaire Électrotechnique International (VEI) – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

Guide ISO/IEC 98-3:2008*, Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*