

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



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 978-2-8322-3993-3

**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.**

REDLINE VERSION

VERSION REDLINE



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

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 $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$	122
Table B.2 – Antenna set-up for the SAM for biconical antennas with averaging of $F_a(h,H)$	123
Table B.3 – Example measurement uncertainty budget for $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ in the frequency range below 300 MHz	125
Table B.5 – Example measurement uncertainty budget for $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ 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 $\leq 0,3$ 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	Incertainces 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 $F_a(h,H)$ par la méthode SAM et déduction de F_a	332
B.4.3	Mesurage de $F_a(h,H)$ 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'ECSM	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 $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ 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 $\tan(\dots)$ 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 $F_a(h,H)$	333
Tableau B.2 – Montage d'antennes pour la méthode SAM pour des antennes biconiques avec calcul de la moyenne de $F_a(h,H)$	333
Tableau B.3 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ dans la gamme de fréquences en dessous de 300 MHz.....	335
Tableau B.5 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du facteur $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ 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 $\leq 0,3$ dB	359
Tableau C.2 – Facteurs de correction $\Delta F_{a,SSM}$ 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)*

FINAL VERSION

VERSION FINALE



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**

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 $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$	122
Table B.2 – Antenna set-up for the SAM for biconical antennas with averaging of $F_a(h,H)$	123
Table B.3 – Example measurement uncertainty budget for $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ in the frequency range below 300 MHz	125
Table B.5 – Example measurement uncertainty budget for $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ 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 $\leq 0,3$ 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	Incertainces 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) Étalonage 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 $F_a(h,H)$ par la méthode SAM et déduction de F_a	332
B.4.3	Mesurage de $F_a(h,H)$ 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'ECSM	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 $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ 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 $\tan(\dots)$ 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 $F_a(h,H)$	333
Tableau B.2 – Montage d'antennes pour la méthode SAM pour des antennes biconiques avec calcul de la moyenne de $F_a(h,H)$	333
Tableau B.3 – Exemple de budget d'incertitude de mesure pour le facteur $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ dans la gamme de fréquences en dessous de 300 MHz.....	335
Tableau B.5 – Exemple de budget d'incertitude de mesure du facteur $F_a(h,H)$ 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 $F_a(h,H)$ 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 $\leq 0,3$ dB	359
Tableau C.2 – Facteurs de correction $\Delta F_{a,SSM}$ 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)*