

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Fibre optic communication subsystem test procedures –
Part 2-13: Digital systems – Measurement of error vector magnitude**

**Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunication fibroniques –
Partie 2-13: Systèmes numériques – Mesure de l'amplitude du vecteur d'erreur**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-2-13:2024



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2024 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews, graphical symbols and the glossary. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Fibre optic communication subsystem test procedures –
Part 2-13: Digital systems – Measurement of error vector magnitude**

**Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunication fibroniques –
Partie 2-13: Systèmes numériques – Mesure de l'amplitude du vecteur d'erreur**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.180.10

ISBN 978-2-8322-9403-1

**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.**

CONTENTS

FOREWORD.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Background and terminology	8
4.1 General.....	8
4.2 Vector modulated signals	9
4.3 Constellation diagram	10
4.4 Normalization of the reference constellation.....	11
4.5 Scaling of the measured vectors	12
4.6 Error vector magnitude of individual symbols	12
4.7 Root-mean-square EVM.....	13
4.8 Calculation of the scale factor	14
4.9 Iterative calculation of the scale factor	15
4.10 EVM for polarization multiplexed signals	16
5 EVM measurement procedure.....	16
5.1 Apparatus	16
5.2 Preparation of data samples	17
5.3 Calculation of the RMS EVM	17
5.3.1 General	17
5.3.2 Procedure with known reference states	18
5.3.3 Procedure with unknown reference states.....	18
5.4 Reporting	19
Annex A (informative) Relationship between RMS EVM and Q-factor.....	20
Bibliography.....	25
Figure 1 – Constellation diagrams of measured QPSK and 16-QAM symbols.....	11
Figure 2 – Error vector magnitude $D(k)$ of a single QPSK symbol.....	13
Figure A.1 – In-phase and quadrature histograms of a QPSK signal	22
Figure A.2 – In-phase and quadrature histograms of a 16-QAM signal	23
Table A.1 – Q-factor parameters for a QPSK signal	22
Table A.2 – Q-factor parameters for a 16-QAM signal	24

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FIBRE OPTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM TEST PROCEDURES –**Part 2-13: Digital systems – Measurement of error vector magnitude**

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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 61280-2-13 has been prepared by subcommittee 86C: Fibre optic systems and active devices, of IEC technical committee 86: Fibre optics. It is an International Standard.

The text of this International Standard is based on the following documents:

Draft	Report on voting
86C/1900/CDV	86C/1924/RVC

Full information on the voting for its approval can be found in the report on voting indicated in the above table.

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

A list of all parts of the IEC 61280 series, published under the general title *Fibre optic communication subsystem test procedures*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-2-13:2024

INTRODUCTION

The error vector magnitude (EVM) is a single, real-valued parameter that characterizes the signal quality of n -state amplitude phase shift keyed (n -APSK) signals, which are also known as vector modulated signals. Similar to the Q-factor used for intensity-modulated directly-detected optical signals, it measures the average deviations of the transmitted signal states from their ideal values. These deviations can be caused by noise and by linear and nonlinear waveform distortions. The EVM is therefore a useful quantity to characterize the quality of transmitted source signals at the input of a transmission system or the quality of received signals at the output of a transmission system [1]¹.

Despite the fact that the EVM is often reported by commercial optical modulation analysers, there are only a few standards that define a procedure for calculating the EVM of optical signals.

ITU-T Recommendation G.698.2 [2], for example, specifies a maximal EVM value for polarization-multiplexed 100 Gbit/s QPSK signals generated by an optical transmitter at the input of a DWDM transmission system. These recommendations provide detailed instructions for numerical signal processing steps that are to be performed on the received signal before the EVM is calculated. The steps include removal of undesired frequency and phase offsets, spectral filtering, DC offset removal, and even the addition of artificial noise to the signal.

Similarly, OIF Implementation Agreement OIF-400ZR-01.0 [3] describes a set of signal processing steps for determining the EVM in polarization-multiplexed 400 Gbit/s 16-QAM signals, which include the addition of artificial noise, but does not specify a maximal EVM value for the transmitted signals at the input of the transmission system.

The detailed signal processing steps defined in ITU-T G.698.2 and in OIF-400ZR-01.0 are specific to the particular modulation formats and to the applications considered in these documents. They are not applicable to arbitrary n -APSK signals or to other applications.

This document specifies a general procedure for calculating the EVM of optical n -APSK signals from a set of transmitted and properly received symbols. It does not specify any signal processing steps necessary to extract the symbols from the raw received signals or optional processing steps impacting the signal quality. This document rather defines the normalization of the reference states used in the EVM calculations as well as a procedure for proper scaling of the measured signal states. It is intended to serve as a reference for instrument vendors, transmission equipment manufacturers, and users of such instruments and transmission equipment.

The procedures described in this document apply to single-polarized optical signals as well as to conventional polarization-multiplexed signals with independently modulated polarization tributaries, which are often referred to as three-dimensionally (3-D) coded signals. In general, it is not advisable to apply these procedures without modifications to four-dimensionally (4-D) coded signals, in which optical amplitude, phase and polarization state are simultaneously modulated to encode the information data [4]. At the time of writing, procedures for calculating the EVM of 4-D coded signals were still under study.

¹ Numbers in brackets refer to the Bibliography.

FIBRE OPTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM TEST PROCEDURES –

Part 2-13: Digital systems – Measurement of error vector magnitude

1 Scope

This part of the IEC 61280-2 series defines a procedure for calculating the root-mean-square error vector magnitude of optical n -APSK signals from a set of measured symbols. It specifically defines the normalization of the reference states and a procedure for optimal scaling of the measured symbol states.

The procedure described in this document applies to single-polarized optical signals as well as to conventional polarization-multiplexed signals with independently modulated polarization tributaries. In general, it is not advisable to apply these procedures without modification to signals, in which optical amplitude, phase, and polarization state are simultaneously modulated to encode the information data.

This document does not specify any signal processing steps for extracting the symbols from the received optical signals, because these steps depend on the optical receiver and can vary with the type of the transmitted n -APSK signal. These and optional additional signal processing steps are defined in application-specific documents.

2 Normative references

There are no normative references in this document.

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

ISO and IEC maintain terminology databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp>

3.1

digital modulation

modulation of an optical sinusoidal carrier by a digital signal

Note 1 to entry: Digital modulation is generally an amplitude shift keying, a frequency shift keying, a phase shift keying or their combination.

[SOURCE: IEC 60050-713:1998, 713-07-12, modified – addition of "optical".]

3.2

binary (digital) signal

digital signal in which each signal element has one of two permitted discrete values

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-16-03]

3.3 **n -ary (digital) signal**

digital signal in which each signal element has one of n permitted discrete values

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-16-05]

3.4 **n -state amplitude phase shift keying** **n -APSK**

digital modulation in which each element of a modulating signal is represented by one of n specified combinations of phase and amplitude of a sinusoidal oscillation

[SOURCE: IEC 60050-713:1998, 713-07-13, modified – Note 1 to entry deleted.]

3.5**quadrature phase shift keying****QPSK**

quadrature phase modulation phase shift keying in which the phase shift takes four values that are multiples of 90°

[SOURCE: IEC 60050-702:2018, 702-06-43]

3.6 **n -state quadrature amplitude modulation** **n -QAM**

an n -state amplitude phase shift keying which can be obtained by amplitude shift keying of two carriers in quadrature, the modulated signals being added

Note 1 to entry: In some cases, n is equal to 2^{2p} , where p is an integer, and the signal constellation points form a square (e.g. for square n -QAM).

[SOURCE: IEC 60050-713:1998, 713-07-14, modified – Note 1 to entry added.]

3.7**signal constellation (in digital modulation)**

scatter of n points representing in an amplitude-phase diagram the modulated signal in n -state amplitude phase shift keying.

Note 1 to entry: The signal constellation is often plotted in a two-dimensional IQ diagram, in which the two axes represent the in-phase and quadrature components of the amplitude phase shift keyed signals.

[SOURCE: IEC 60050-713:1998, 713-07-15, modified – Note 1 to entry added.]

3.8**input signal (of a transmission system)****transmitted source signal**

signal applied to the input port of the sending terminal equipment of a transmission system

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-04-11]

3.9**reference signal (of a transmission system)**

ideal undistorted version of the transmitted source signal

3.10

output signal (of a transmission system)

received source signal

signal emitted from an output port of the receiving terminal equipment of a transmission system

Note 1 to entry: Ideally, the output signal of a transmission system should be an undistorted version of the corresponding input signal.

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-04-12]

3.11

polarization multiplex transmission

polarization multiplexed transmission

method of transmission employing multiplexing of two orthogonally polarized signals at the input terminal of a transmission path and complementary demultiplexing at the output terminal

[SOURCE: IEC 60050-704:1992, 704-08-09, modified – "polarization" added to the term; "of two orthogonally polarized signals" added to the definition.]

3.12

decision circuit (for a digital signal)

circuit that decides the probable value of a signal element of a received digital signal

[SOURCE: IEC 60050-704:1992, 704-16-12]

3.13

symbol (in digital modulation)

one of the n states of the modulated signal in n -state amplitude phase shift keying

3.14

error vector magnitude

EVM

difference between the measured signal and a reference

Note 1 to entry: A reference is a perfectly modulated signal.

[SOURCE: ISO/IEC 24769-2:2013, 3.1.1]

3.14.1

RMS error vector magnitude

EVM_{rms}

E_{rms}

root-mean-square average of the error vector magnitudes of N symbols of an n -APSK signal

Note 1 to entry: The value of the RMS EVM is greater than zero and is usually expressed in percent.

4 Background and terminology

4.1 General

Clause 4 provides background information on the EVM calculations and defines the terminology used in this document.

The error vector magnitude (EVM) is a single, real-valued parameter that measures the average deviations of the various signal states in n -state amplitude phase shift keyed (n -APSK) signals from their ideal values. Its value is zero for an ideal n -APSK signal and larger than zero for real (i.e. distorted) n -APSK signals. The EVM is frequently expressed in percent.

Frequently, n -APSK signals are also referred to as vector modulated signals (see 4.2), because they can be represented as vectors in a two-dimensional constellation diagram, as described in 4.3. The average EVM of a transmitted signal is determined from a fairly large number of transmitted symbols (e.g. larger than 1 000) by first calculating the deviation of the transmitted state (i.e. the measured state) from its corresponding ideal state individually for each transmitted symbol, as described in 4.6, and then averaging these deviations as the root-mean-square of the individual deviations, as described in 4.7.

The resulting quantity is usually referred to as the root-mean-square EVM and abbreviated as RMS EVM or EVM_{rms} . The RMS EVM can be viewed as a generalization of the Q-factor, which is often used to characterize the quality of binary and n -ary intensity-modulated signals. In fact, RMS EVM and Q-factor are closely related, as described in Annex A.

Important elements of the EVM calculation are the normalization of the reference states, which is specified in 4.4, and the scaling of the measured states, which is specified in 4.5 and 4.8.

4.2 Vector modulated signals

In general, vector modulated signals are composed of an in-phase component, characterized by a time-varying amplitude $A_I(t)$, and a quadrature component, characterized by a time-varying amplitude $A_Q(t)$. Both components are modulated on the same optical carrier frequency, with the optical phase of the quadrature component being shifted by 90° relative to the in-phase component. Hence, the time-varying optical amplitude of vector modulated signals can be represented by a complex function $A_c(t)$, as shown in Formula (1).

$$A_c(t) = \sqrt{P_S} \left[A_I(t) + jA_Q(t) \right] e^{j[\omega_s t + \varphi_s(t)]} \quad (1)$$

where

- P_S is the average optical power of the signal;
- $A_I(t)$ is the in-phase component of the modulated signal;
- $A_Q(t)$ is the quadrature component of the modulated signal;
- $\omega_s = 2\pi f_s$ is the angular frequency of the unmodulated optical signal (i.e. optical carrier);
- $\varphi_s(t)$ represents additional optical phase variations.

NOTE 1 In Formula (1), the amplitudes $A_I(t)$ and $A_Q(t)$ are normalized so that the time average $\langle A_I^2(t) + A_Q^2(t) \rangle$ is equal to 1. This normalization is different from the one used for calculating the EVM.

Equivalently, $A_c(t)$ can be represented by a 2-dimensional vector $\mathbf{A}_v(t)$, as shown in Formula (2), where $A_I(t)$ and $A_Q(t)$ define the components of this vector.

$$\mathbf{A}_v(t) = \sqrt{P_S} \begin{bmatrix} A_I(t) \\ A_Q(t) \end{bmatrix} e^{j[\omega_s t + \varphi_s(t)]} \quad (2)$$

In quadrature phase shift keying (QPSK), for example, $A_I(t)$ and $A_Q(t)$ are independent binary amplitude modulated signals (whose symbol periods are properly synchronized), whereas in 16-state quadrature amplitude modulation (16-QAM), $A_I(t)$ and $A_Q(t)$ are both quaternary amplitude modulated signals.

NOTE 2 Vector modulated signals are often generated by two independent optical amplitude modulators (e.g. Mach-Zehnder modulators) that are connected in parallel to the same light source and operated in such a way that the optical phase in one of the modulators is delayed by 90° relative to that in the other modulator. More information on the generation and detection of vector modulated signals can be found in IEC TR 61282-16 [6].

4.3 Constellation diagram

The time varying signal components $A_I(t)$ and $A_Q(t)$ of a vector modulated signal can be plotted in a two-dimensional graph, according to Formula (2). Typically, the abscissa represents the in-phase component $A_I(t)$ and the ordinate the quadrature component $A_Q(t)$. In general, these plots display only one pair of amplitude values $[A_I(t_k), A_Q(t_k)]$ for each transmitted symbol, which corresponds to a two-dimensional state vector $S(k)$, as shown in Formula (3).

$$S(k) = \begin{bmatrix} A_I(t_k) \\ A_Q(t_k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

where

k is an integer, with $k = 1, 2, 3, \dots, N$.

The time t_k at which the amplitudes $A_I(t)$ and $A_Q(t)$ are sampled shall be chosen to best represent the state of the transmitted n -APSK symbol. However, no decision shall be made on the probable value of the transmitted symbol (i.e. the samples shall be taken prior to a decision circuit). Moreover, the signal amplitudes of all analysed symbols shall be sampled at the same position within each symbol period T_s , so that all sampling times are spaced by an integer multiple of T_s , as described by Formula (4).

$$t_k = kT_s + \Delta t \quad (4)$$

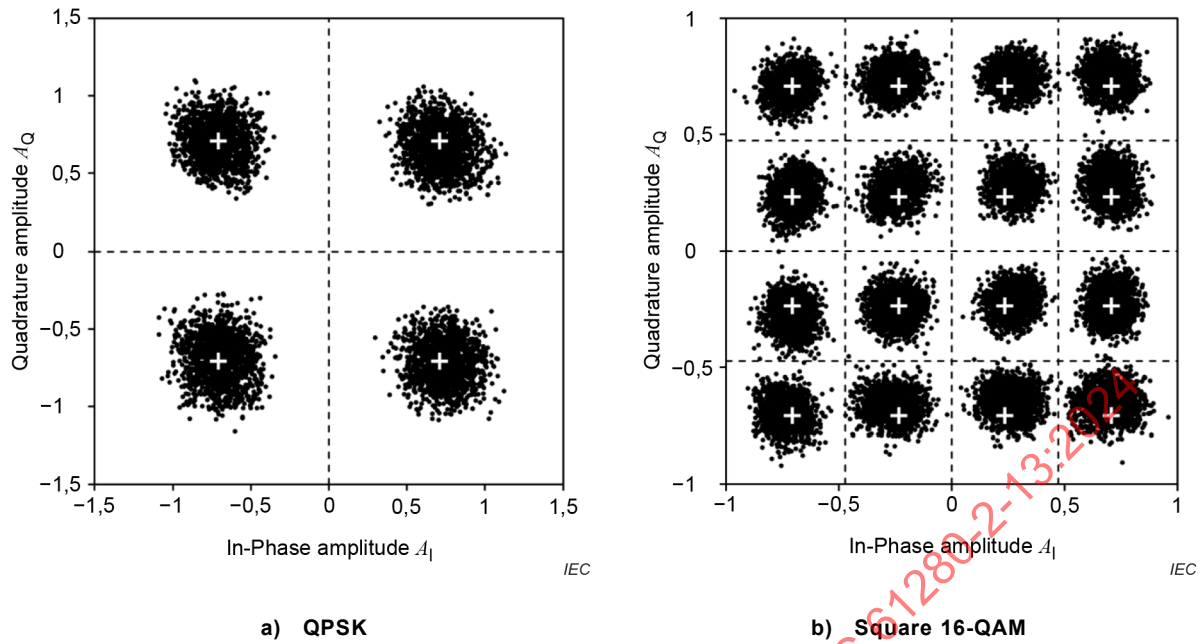
where

Δt is the time offset in each symbol period;

k is an integer, with $k = 1, 2, 3, \dots, N$.

The scatter plot of the state vectors $S(k)$ of a vector modulated signal is called a constellation diagram. Figure 1 displays the constellation diagrams of two widely used n -APSK signals: a transmitted QPSK signal and a transmitted square 16-QAM signal.

NOTE The signal amplitudes displayed in Figure 1 are scaled according to the procedures described in 4.5 and 4.8.

**Key**

- Solid black dots Measured signal states (scaled as described in 4.5 and 4.8)
- White crosses Reference states (see 4.4)
- Dashed lines Midpoints between the in-phase and quadrature components of the reference states

Figure 1 – Constellation diagrams of measured QPSK and 16-QAM symbols**4.4 Normalization of the reference constellation**

The signal constellation of an ideal n -APSK signal is represented by n different points in the constellation diagram, which correspond to n different reference vectors $\mathbf{R}(m)$, $m = 1, 2, \dots, n$. The reference vectors shall be normalized so that the longest vector has unity length, as shown in Formula (5).

$$\max_{m=1, \dots, n} \{ |\mathbf{R}(m)| \} = 1 \quad (5)$$

The reference states are unitless.

NOTE The reference states are sometimes normalized so that the average power of all possible reference states is equal to one, i.e. $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathbf{R}(i)|^2 = 1$. This normalization is often used in EVM calculations of electrical n -APSK

signals [5]. For QPSK signals, it is identical to the normalization specified in 4.4, but for n -APSK signals of higher cardinality, like 16-QAM signals, the two normalizations lead to substantially different EVM values [1]. The normalization defined in this document is commonly used for optical signals and is identical to the one used in OIF-400ZR-01.0 [3].

4.5 Scaling of the measured vectors

The measured state vectors $S(k)$ of the transmitted n -APSK signal in general are scaled differently than the reference vectors $R(m)$. For a useful comparison between $S(k)$ and $R(m)$, rescale the measured states $S(k)$, i.e. multiply with a common scale factor α . This scaling is impeded by the fact that the state vectors $S(k)$ are typically scattered around the ideal constellation points and can even exhibit significant offsets from these points. Since the EVM characterizes the deviation of the measured state vectors $S(k)$ from their ideal states $R(m)$, the optimal scale factor α is the one that minimizes the average deviations of the scaled state vectors $\alpha S(k)$ from the associated reference vectors $R[m(k)]$, for all $k = 1, \dots, N$. The calculation of the optimal scale factor is specified in 4.8 and 4.9.

The scaled state vectors are represented by $S_\alpha(k) = \alpha S(k)$, where α denotes the common scale factor.

4.6 Error vector magnitude of individual symbols

To calculate the EVM of the measured signal, each of the measured state vectors $S_\alpha(k)$ is associated with a reference vector $R(m)$ from the set of n possible states, ideally with the transmitted reference vector.

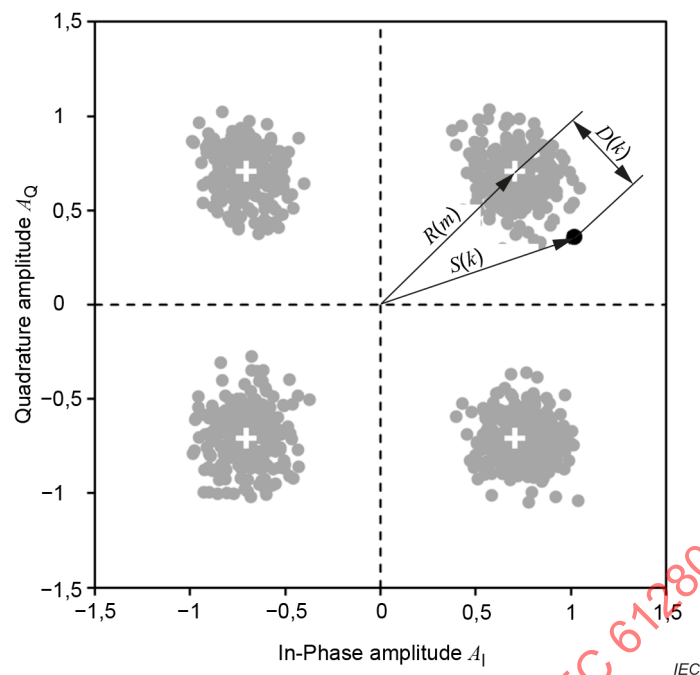
If the sequence of the transmitted reference states is known, which is the case when a well-defined test signal has been transmitted, the reference vectors can be determined from this sequence by properly correlating the received symbols with the transmitted states. If the transmitted states are unknown, which is often the case, each $S_\alpha(k)$ is associated with the reference vector $R(m)$ that is closest to $S_\alpha(k)$ in the constellation diagram.

NOTE For signals with only a few possible states n (e.g. for QPSK signals), it is often straightforward to associate a measured state with the transmitted reference state. However, this association becomes increasingly more difficult with increasing number of states n , especially when the measured signal is noisy or otherwise distorted. Improperly associated states generally lead to an underestimation of the EVM. However, the number of improperly associated states is usually much smaller than that of properly associated states (e.g. because of the exponential distribution of noise), so that the impact on the RMS EVM can be disregarded in many cases.

The association of each $S_\alpha(k)$ with a corresponding $R(m)$ thus establishes a relationship between k and m , which can be described by a function $m(k)$, so that each measured state vector $S(k)$ is associated with a reference vector $R[m(k)]$.

The EVM of the k -th received symbol is given by the distance $D(k)$ between $S_\alpha(k)$ and $R[m(k)]$, as described by Formula (6) and illustrated in Figure 2.

$$D(k) = |S_\alpha(k) - R[m(k)]| \quad (6)$$

**Key**

- Solid gray dots Measured signal states
- Solid black dot Selected signal state for which $D(k)$ is calculated
- White crosses Reference states

Figure 2 – Error vector magnitude $D(k)$ of a single QPSK symbol

4.7 Root-mean-square EVM

The average error vector magnitude E_{rms} of all transmitted symbols is given by the root-mean-square average of all $D(k)$, $k = 1, \dots, N$, as shown in Formula (7).

$$E_{\text{rms}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N |S_a(k) - \mathbf{R}[m(k)]|^2} \quad (7)$$

This parameter is often referred to as the rms error vector magnitude and abbreviated as RMS EVM or E_{rms} .

For most accurate results, a large number N of symbols should be collected. Each of the possible states of the n -APSK signal should be represented with the same probability as expected in normal operation of the transmission system. For signals with equiprobable distribution of all possible states, at least 100 symbols should be collected for each state. For signals with probabilistically shaped constellation [8], the states in the analysed set of symbols should be represented according to the prescribed probability function for the symbols. Specially designed test signals are sometimes transmitted for the EVM measurement, to ensure the desired distribution of the transmitted symbols as well as randomization of the order in which they are transmitted. Once the symbols have been collected, their EVM can be evaluated in arbitrary order. If necessary, the symbols can be collected in several independent measurements.

The RMS EVM of the QPSK symbols displayed in the example of Figure 1 a) is 17 %, whereas the RMS EVM of the 16-QAM symbols in Figure 1 b) is only 8,6 %. In both cases, the EVM calculation includes 64 000 symbols.

4.8 Calculation of the scale factor

As explained in 4.5, the measured state vectors $\mathbf{S}(k)$ are scaled so that the deviations of the scaled state vectors $\mathbf{S}_\alpha(k) = \alpha \mathbf{S}(k)$ from their associated reference vectors are minimal. Proper scaling is necessary to avoid undesired offsets in E_{rms} . The scale factor α shall be calculated from the measured states and their associated reference states as shown in Formula (8).

$$\alpha = \frac{\sum_{k=1}^N |\mathbf{R}[m(k)]|^2}{\sum_{k=1}^N \mathbf{S}(k) \cdot \mathbf{R}[m(k)]} \quad (8)$$

where " $\cdot$ " denotes the scalar vector product.

For signals with equiprobable distribution of all possible n signal states, Formula (8) can be approximated by Formula (9).

$$\alpha = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathbf{R}(i)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{S}(k) \cdot \mathbf{R}[m(k)]} \quad (9)$$

For signals with probabilistically shaped constellation, Formula (8) can be approximated by Formula (10).

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n p(i) |\mathbf{R}(i)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{S}(k) \cdot \mathbf{R}[m(k)]} \quad (10)$$

where

$p(i)$ is the probability of reference symbol i to be transmitted, with $\sum_{i=1}^n p(i) = 1$.

NOTE 1 For signals with equiprobable distribution of all possible states, $p(i) = 1/n$, for $i = 1, \dots, n$, in which case Formula (10) becomes Formula (9).

The scale factor α in Formula (8) is derived by scaling all reference vectors $\mathbf{R}(m)$ with a common factor β , whose value is selected so that it minimizes the root-mean-square distance D_{rms} between $\mathbf{S}(k)$ and $\beta \mathbf{R}(m)$, where D_{rms} is defined in Formula (11).

$$D_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{S}(k) - \beta \mathbf{R}[m(k)]|^2} \quad (11)$$

The desired value of β can be calculated analytically from the condition $\partial D_{\text{rms}}/\partial\beta = 0$, which yields $\beta = 1/\alpha$, where α is given by Formula (8).

NOTE 2 In general, it is not possible to calculate the optimal scale factor α directly from Formula (6) by minimizing E_{rms} , because α scales not only the centroid of the measured state vectors but also the added noise and waveform distortions, which can introduce a significant offset in E_{rms} .

When the sequence of the transmitted (ideal) states is known and properly correlated with that of the received symbols, all reference states $\mathbf{R}[m(k)]$ can be determined a priori, so that the desired scale factor α can be directly calculated from Formula (8).

When the received symbols are unknown, α cannot be calculated from Formula (8) until each measured state $\mathbf{S}(k)$ is associated with a corresponding reference state $\mathbf{R}(m)$, as described in 4.6. Since $\mathbf{S}(k)$ shall be associated with the reference state $\mathbf{R}(m)$ that is closest to the scaled state $\mathbf{S}_\alpha(k)$, the scale factor α generally has to be known before α can be calculated from Formula (8). In this case, α shall be determined using the iterative procedure described in 4.9.

NOTE 3 For signals with very few possible states, like QPSK signals, it is possible to assign the reference states directly to the measured states without prior scaling. For QPSK signals, for example, all measured states found in a given quadrant are assigned the one and only reference state in this quadrant. In this case, α can be calculated directly from Formula (8).

4.9 Iterative calculation of the scale factor

The iterative procedure for calculating alpha, as described in 4.9, is only required if the transmitted symbols are unknown. The procedure starts with an initial rough estimate of the desired scale factor, denoted α_1 , which is used as a first approach to scale the measured state vectors. For signals with equiprobable distribution of all possible signal states, an initial estimate of α can be obtained from the square root of the ratio of the average power of all reference states $\mathbf{R}(m)$ to the average power of all measured symbols $\mathbf{S}(k)$, as shown in Formula (12).

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathbf{R}(i)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{S}(k)|^2}} \quad (12)$$

For signals with probabilistically shaped constellations, the reference states shall be weighted by the probability of their occurrence in the transmitted signal, as shown in Formula (13).

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p(i) |\mathbf{R}(i)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{S}(k)|^2}} \quad (13)$$

where

$p(i)$ is the probability of reference symbol i to be transmitted, with $\sum_{i=1}^n p(i) = 1$.

NOTE 1 For signals with equiprobable distribution of all possible states, where $p(i) = 1/n$, for $i = 1, \dots, n$, Formula (13) is identical to Formula (12). Hence, Formula (13) is a generalized form of Formula (12). The initial estimate of Formula (13) is most accurate for signals with fairly small waveform distortions and low noise. For noisy signals, a

more accurate estimate of the scale factor can often be obtained by analysing the distribution of the sampled symbols in the constellation diagram. In the case of square n -QAM signals, for example, the scale factor can be obtained from histograms of the in-phase and quadrature components of the measured signal states, as shown in Figure A.2 for a 16-QAM signal. If the waveform distortions in the signal are small, α_1 can be obtained from the distance between the two outermost peaks, $D_{\text{out}} = |\mu_4 - \mu_1|$, so that $\alpha_1 = \sqrt{2}/D_{\text{out}}$. More refined estimates could be used for highly distorted signals. However, the methods are usually specific to a particular modulation format and, therefore, cannot easily be generalized to arbitrary n -APSK signals.

Once the initial estimate α_1 has been determined, the following procedure shall be performed.

- a) Scale the measured state vectors as $S_{\alpha_1}(k) = \alpha_1 S(k)$, using the initial scale factor α_1 ;
- b) For each symbol k , find the reference state $R(m)$ that is closest to $S_{\alpha_1}(k)$ (see 4.6), to obtain a first relation between m and k , denoted $m_1(k)$;
- c) Calculate α from Formula (8), using $m(k) = m_1(k)$ from step b), to obtain an improved scale factor α_2 ;
- d) Rescale the measured state vectors as $S_{\alpha_2}(k) = \alpha_2 S(k)$, using α_2 from step c).
- e) For each symbol k , find the reference state $R(m)$ that is closest to $S_{\alpha_2}(k)$ (see 4.6), yielding a second relation between m and k , denoted $m_2(k)$;
- f) Repeat steps c) through e) until there is no significant difference between α_l and α_{l-1} ;
- g) Calculate the EVM $D(k)$ for each symbol k , using $m_l(k)$ and $S_{\alpha_l}(k)$ from the last iteration of steps d) and e) in Formula (5).

NOTE 2 If the transmitted signal is distorted by excessive noise or other waveform distortions, it is possible that the nearest reference state of a transmitted symbol does not correspond to its ideal state. In this case, the distance calculated from Formula (5) is smaller than it would be if the corresponding reference state was known, thus resulting in an underestimation of the RMS EVM. This problem is not encountered when the reference states of the transmitted signals are known.

4.10 EVM for polarization multiplexed signals

In polarization multiplexed signals, two different n -APSK signals are transmitted, either simultaneously or alternately, in two orthogonal polarization states. The signals corresponding to these two states are usually referred to as the X-polarized and Y-polarized signals. In this case, the transmitted symbols shall be measured and processed separately for the X- and Y-polarized signals, so that two root-mean-square EVM values are obtained. If the X- and Y-polarized signals have identical reference states $R(m)$, the two EVM values may be averaged by root-mean-square to a single RMS EVM value.

5 EVM measurement procedure

5.1 Apparatus

A linear optical receiver shall be used to convert the optical signals to be analysed into electrical signals. The receiver shall have enough optical and electrical bandwidth to capture the entire spectrum of the transmitted signal. The received analogue electrical signals shall be converted to digital signals, using analogue-to-digital converters, and recorded as digital data to allow further signal processing and analysis.

NOTE Suitable optical receivers include optical modulation analyzers and well-calibrated commercial telecommunication receivers. Optical n -APSK signals are frequently detected with intradyne coherent receivers having phase and polarization diversity [7]. These receivers typically generate four analogue electrical signals, from which the transmitted symbols can be retrieved through various signal processing steps, as described in more detail in IEC TR 61282-16 [6]. The steps can be performed with hardware or software based digital signal processors.

5.2 Preparation of data samples

The recorded data obtained from the optical receiver shall be processed so that the electrical signals optimally represent the transmitted symbols of the optical signal. This means that they should be corrected for any linear and nonlinear distortions introduced in the receiver, including

- a) Magnitude and phase of the receiver frequency dependence (e.g. frequency roll-off);
- b) Imbalances between the in-phase and quadrature components of the received signal;
- c) Time delays (i.e. skews) between the in-phase and quadrature components of the signal;
- d) Phase errors between the received in-phase and quadrature components;
- e) Time-varying frequency and phase offsets in the signals;
- f) Nonlinear response of the photoreceivers and analogue-to-digital converters.

NOTE The time-varying frequency and phase offsets are usually determined and corrected on relatively small subsets of consecutively transmitted symbols (e.g. on 10 to 1 000 symbols), which sometimes overlap, to remove undesired laser phase and frequency noise. The number of symbols in each of these subsets depends on the magnitude and rate of the expected frequency and phase variations.

If necessary, waveform distortions caused by chromatic dispersion (including predistortion of chromatic dispersion in the transmitted signal), polarization mode dispersion, and polarization-dependent loss in the optical path between the transmitter and receiver should also be removed.

In case the transmitted signal is spectrally shaped (e.g. with a root-raised cosine function) under the assumption that the spectrum of the received signal will be further shaped with a similar filter function (e.g. a matched root-raised cosine function), the recorded data should be spectrally shaped with the expected receiver filter function before the EVM is calculated.

The data shall be processed without making decisions on the probable transmitted states (e.g. no data-aided signal processing shall be used).

The resulting signals shall then be resampled and retimed, so that each transmitted symbol is represented by one pair of signal samples A_I and A_Q . These samples are the measured signals states $S(k)$, from which the EVM is calculated. When polarization multiplexed signals are transmitted, the received signals shall be demultiplexed, so that the symbols transmitted in the two orthogonal polarization states are properly separated.

Some applications require additional signal processing steps to be performed prior to the EVM calculations, such as but not limited to the following examples:

- removal of DC offsets in the deconvoluted signals;
- spectral filtering or shaping (including filtering applied in resampling of the data);
- addition of noise.

If any of these additional signal processing steps are performed, the procedures shall be described and reported together with the calculated EVM values.

5.3 Calculation of the RMS EVM

5.3.1 General

At least $N = 100 \times n$ symbols shall be evaluated to calculate the RMS EVM of an n -APSK signal. For signals with equiprobable distribution of the n possible states, each symbol shall be represented with equal probability in the set of analysed symbols. For signals with probabilistically shaped constellations [8], the distribution of the measured states in the analysed set of symbols shall be as close as possible to the prescribed probability function for the signal constellation. The evaluated symbols do not have to be transmitted consecutively in time and, hence, can be collected in several independent measurements.

The procedure described in 5.3.2 shall be performed when the reference state of each measured symbol is known a priori or when it can be determined without scaling of the measured states. Otherwise, the procedure described in 5.3.3 shall be performed.

5.3.2 Procedure with known reference states

The following steps shall be performed when the reference state corresponding to each measured symbol is known a priori or when the relationship $m(k)$ can be determined without prior scaling of the N measured states.

- 1) Normalize the n reference state vectors $\mathbf{R}(m)$ of the transmitted n -APSK signal according to Formula (5), so that their maximal length $|\mathbf{R}(m)|$ is unity, for $m = 1, \dots, n$.
- 2) Associate each state vector $\mathbf{S}(k)$ with its known reference vector $\mathbf{R}[m(k)]$, for all $k = 1, \dots, N$, to establish a relationship between m and k , denoted as $m(k)$.
- 3) Calculate the scale factor α from Formula (8) using all N measured state vectors $\mathbf{S}(k)$ and their associated reference vectors $\mathbf{R}[m(k)]$.
- 4) Multiply the vectors $\mathbf{S}(k)$ with α to obtain the scaled state vectors $\mathbf{S}_\alpha(k) = \alpha \mathbf{S}(k)$.
- 5) Calculate the distances $D(k)$ between the vectors $\mathbf{S}_\alpha(k)$ and $\mathbf{R}[m(k)]$ from Formula (6), for all $k = 1, \dots, N$.
- 6) Calculate the root-mean-square EVM E_{rms} from Formula (7) using the distances $D(k)$ determined in step 5), $k = 1, \dots, N$.
- 7) In the case of polarization multiplexed signals, repeat steps 1) to 6) for the symbols transmitted in the second polarization state.

5.3.3 Procedure with unknown reference states

The following steps shall be performed when the reference states of the transmitted symbols are unknown and cannot be determined without prior scaling of the N measured states.

- 1) Normalize the n reference state vectors $\mathbf{R}(m)$ of the measured n -APSK signal according to Formula (5), so that their maximal length $|\mathbf{R}(m)|$ is unity, for $m = 1, \dots, n$;
- 2) Calculate an initial scale factor α , using Formula (13). Alternatively, a more precise estimate for the initial scale factor may be used;
- 3) Multiply all vectors $\mathbf{S}(k)$ by α to obtain the scaled state vectors $\mathbf{S}_\alpha(k) = \alpha \mathbf{S}(k)$, $k = 1, \dots, N$;
- 4) For each scaled vector $\mathbf{S}_\alpha(k)$, determine the reference state $\mathbf{R}(m)$ that has the shortest distance to $\mathbf{S}_\alpha(k)$ in the constellation diagram, as described in 4.6, yielding a relationship between m and k , denoted as $m(k)$;
- 5) Calculate an improved scale factor α from Formula (8) using all N measured state vectors $\mathbf{S}(k)$ and the associated reference vectors $\mathbf{R}[m(k)]$ obtained in step 4);
- 6) Multiply the vectors $\mathbf{S}(k)$ with the improved scale factor α obtained in step 5) to obtain the scaled state vectors $\mathbf{S}_\alpha(k) = \alpha \mathbf{S}(k)$, $k = 1, \dots, N$;
- 7) Repeat steps 3) through 6) until the most recent value of α differs by no more than a given amount from the previous value of α ;
- 8) Calculate the distances $D(k)$ between $\mathbf{S}_\alpha(k)$ and $\mathbf{R}[m(k)]$ from Formula (6), $k = 1, \dots, N$;
- 9) Calculate the root-mean-square EVM E_{rms} from Formula (7) using all distances $D(k)$ determined in step 8);
- 10) In the case of polarization multiplexed signals, repeat steps 1) to 9) for the symbols transmitted in the second polarization state.

5.4 Reporting

The RMS EVM calculated in 5.3 shall be expressed in percent and reported together with the following information:

- the type of the transmitted n -APSK signal;
- the number of symbols used in the EVM calculations;
- the number of symbols used to correct for time-varying phase and frequency offsets;
- the details of any additional signal processing steps applied to the symbols prior to the EVM calculation, such as removal of DC offsets, additional filtering, or added noise.

When polarization-multiplexed signals are transmitted, the RMS EVM shall be reported separately for each of the two transmitted polarization states.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-2-13:2024

Annex A (informative)

Relationship between RMS EVM and Q-factor

The Q-factor is frequently used to characterize the signal quality of intensity-modulated and directly-detected (IMDD) optical signals [9]. Its value is a measure of the variations in the signal levels, quantified as standard deviations, relative to the distance between the average signal levels. For binary modulated signals with only two different signal levels, the Q-factor Q is defined in IEC 61280-2-8 and calculated as shown in Formula (A.1) [9].

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (\text{A.1})$$

where

μ_1 and μ_2 are the mean values of the two signal levels;

σ_1 and σ_2 are the standard deviation values of the variations in the two signal levels;

The Q-factor can be viewed as the one-dimensional equivalence of the inverse RMS EVM, where the average signals levels μ_1 and μ_2 are the reference states, and the sum of the standard deviations σ_1 and σ_2 are the root-mean-square deviations from the reference states.

When the signal states of a transmitted QPSK signal are scattered isotropically about the reference states in the plane of the constellation diagram (e.g. as the result of additive isotropic noise), the distribution of the in-phase components of $S(k)$ is identical to that of its quadrature components. With proper scaling of the state vectors, as described in 4.4 and 4.8, the difference in the mean signal levels is then $|\mu_1 - \mu_2| = \sqrt{2}$, and the standard deviations are $\sigma_1 = \sigma_2 = E_{\text{rms}}/\sqrt{2}$, for both components, so that Q becomes simply the inverse of E_{rms} , as shown in Formula (A.2).

$$Q = \frac{1}{E_{\text{rms}}} \quad (\text{A.2})$$

NOTE 1 If the distribution of the constellation points around the reference states is a Gaussian function (e.g. caused by Gaussian noise), the Q-factor obtained from Formula (A.2) can be used to estimate the expected bit-error ratio (BER) at the optimal decision point. For binary signals, the BER is given by $P_e = 0,5 \operatorname{erfc}(Q/\sqrt{2})$ [9], where erfc denotes the complementary error function commonly used in statistics.

Similar relationships between Q and E_{rms} can be derived for other types of n -APSK signals. For example, the in-phase and quadrature components of square n -QAM signals, with $n = p^2$, vary as one-dimensional p -state amplitude-shift-keyed signals (p -ASK). The Q-factor of these signals can be defined as the average of the individual Q-factors of the $p - 1$ pairs of signal levels, as expressed in Formula (A.3).

$$Q = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^{p-1} \frac{|\mu_{i+1} - \mu_i|}{\sigma_{i+1} + \sigma_i} \quad (\text{A.3})$$

When the n -QAM signal is composed of ideal states to which isotropic noise is added, the relationship between E_{rms} and Q is given by Formula (A.4).

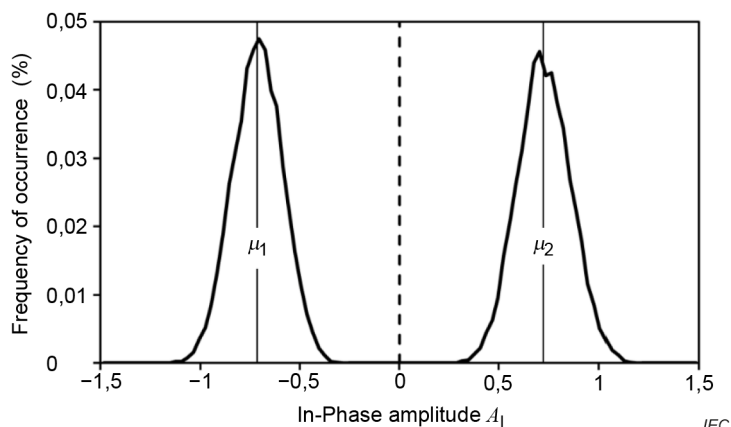
$$Q = \frac{1}{(\sqrt{n} - 1) E_{\text{rms}}} \quad (\text{A.4})$$

For 16-QAM signals, the relationship simplifies to Formula (A.5).

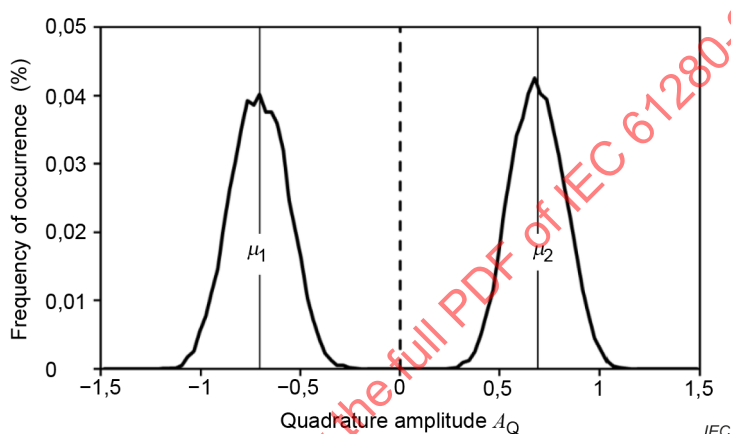
$$Q = \frac{1}{3 E_{\text{rms}}} \quad (\text{A.5})$$

NOTE 2 If the distribution of the constellation points is a Gaussian function, the Q-factor obtained from Formula (A.4) can be used to estimate the expected bit-error ratio (BER), as described in [1]. However, the distribution of the states around their corresponding reference points is often neither isotropic nor symmetric. This can be seen, for example, from the constellation diagrams of the QPSK and 16-QAM signals displayed in Figure 1, and also from histograms of their in-phase and quadrature components displayed in Figure A.1 and Figure A.2.

Figure A.1 shows histograms of the in-phase and quadrature components of the measured QPSK symbols plotted in Figure 1 a). It can be seen from these graphs that the distribution of the in-phase components differs significantly from that of the quadrature components, both in width and position, which leads to different Q-factors for the two components.



a) In-phase component



b) Quadrature component

NOTE The thin solid lines show the mean values of the two signal levels, and the dashed line indicates the midpoint between the two reference states defined in the EVM calculations. Ideally, the dashed line is centered between the mean values of the two signal levels. The signal states are scaled as shown in Figure 1 a).

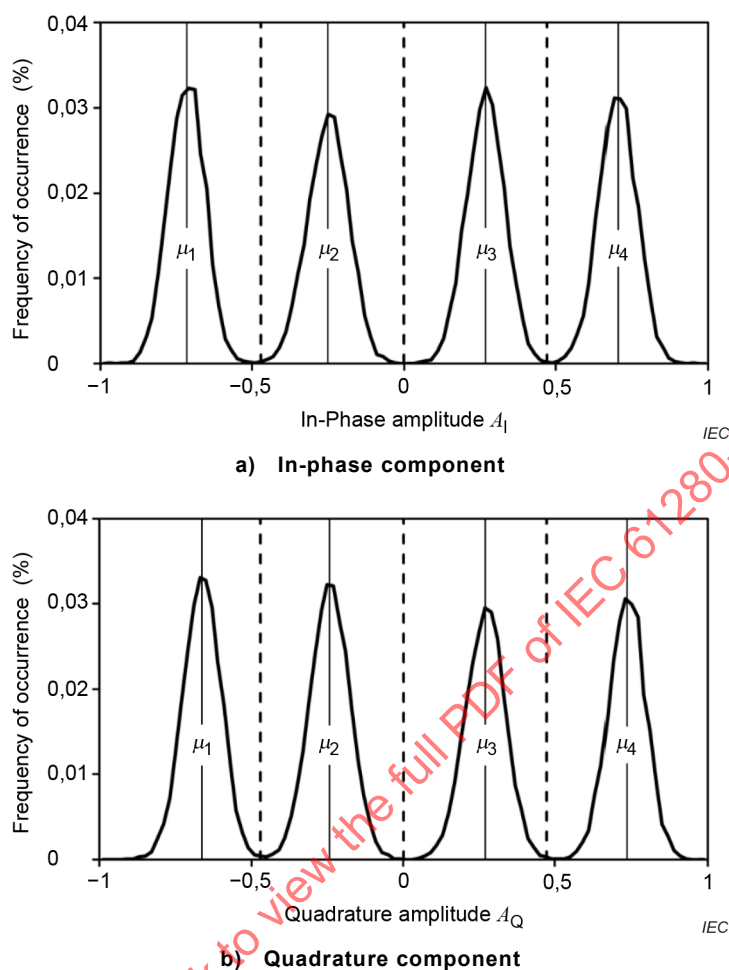
Figure A.1 – In-phase and quadrature histograms of a QPSK signal

Table A.1 summarizes the values of the standard deviations and mean signal levels calculated from the data displayed in Figure A.1. For the in-phase components, these values yield $Q = 5,5$, and for the quadrature components $Q = 5,1$. Both values are smaller than $Q = 5,9$ calculated from Formula (A.2) for $E_{\text{rms}} = 17\%$, because of the anisotropic distributions of the constellation points around their reference states (including lateral shifts), which increase the standard deviations and reduce the Q-factors.

Table A.1 – Q-factor parameters for a QPSK signal

Parameter	Value for in-phase component	Value for quadrature component	Ideal value
σ_1	0,127	0,14	0,12
σ_2	0,135	0,133	0,12
$ \mu_2 - \mu_1 $	1,43	1,39	1,41
Q from Formula (A.1) or (A.2)	5,5	5,1	5.9

Figure A.2 displays histograms of the in-phase and quadrature components of the 16-QAM symbols shown in Figure 1 b).



NOTE The dashed lines indicate the midpoints between the reference states defined in the EVM calculations, and the thin solid lines show the mean values of the signal levels. Ideally, the mean values of the signal levels are centered between the midpoints of the reference states. The signal states are scaled as shown in Figure 1 b).

Figure A.2 – In-phase and quadrature histograms of a 16-QAM signal

Table A.2 summarizes the values of the standard deviations and mean signal levels calculated from the data displayed in Figure A.2, which yield nearly equal Q-factors for the in-phase component, where $Q = 3,7$, and for the quadrature component, where $Q = 3,6$. Both values are somewhat smaller than $Q = 3,9$ calculated from Formula (A.5) for $E_{\text{rms}} = 8,6 \%$.

Table A.2 – Q-factor parameters for a 16-QAM signal

Parameter	Value for in-phase component	Value for quadrature component	Ideal value
σ_1	0,059	0,062	0,061
σ_2	0,067	0,066	0,061
σ_3	0,063	0,065	0,061
σ_4	0,061	0,060	0,061
$ \mu_2 - \mu_1 $	0,47	0,42	0,47
$ \mu_3 - \mu_2 $	0,52	0,51	0,47
$ \mu_4 - \mu_3 $	0,43	0,46	0,47
Q from Formula (A.3) or (A.5)	3,7	3,6	3.9

NOTE 3 The histograms in Figure A.2 and the numerical results in Table A.2 show that the modulation of the transmitted signal is not completely linear, since the larger signal amplitudes are compressed relative to smaller amplitudes. As a result, the separation between the two inner states in Figure A.2 is larger than that between the inner and outer states, i.e. $|\mu_2 - \mu_1| < |\mu_3 - \mu_2| > |\mu_4 - \mu_3|$, and the standard deviations of the inner states are larger than those of the outer states, i.e. $\sigma_2 = 0,067$ and $\sigma_3 = 0,063$ are larger than $\sigma_1 = 0,059$, and $\sigma_4 = 0,061$. This can also be seen directly from Figure 1 b).

Bibliography

- [1] Schmogrow, R., Nebendahl, B., Winter, M., Josten, A., Hillerkuss, D., Koenig, S., Meyer, J., Dreschmann, M., Huebner, M., Koos, C., Becker, J. Freude, W., and Leuthold, J., *Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats*, Photon. Technol. Lett. 24, pp. 61–63 (2012)
 - [2] ITU-T Recommendation G.698.2, *Amplified multichannel dense wavelength division multiplexing applications with single channel optical interfaces* (2018)
 - [3] OIF-400ZR-01.0, *Implementation agreement 400ZR*, Optical Internetworking Forum (2020)
 - [4] Agrell, E., and Karlsson, M. "Power-efficient modulation formats in coherent transmission systems," J. Lightw. Technol. 27, pp. 5115–5126 (2009)
 - [5] IEEE 802.16-2012, *IEEE Standard for air interface for broadband wireless access systems*
 - [6] IEC TR 61282-16, *Fibre optic communication system design guidelines – Part 16: Coherent receivers and transmitters with high-speed digital signal processing*
 - [7] Kazovsky, L. G., *Phase and polarization-diversity coherent optical techniques*, J. Lightw. Technol. 7, pp. 279–292 (1989)
 - [8] Buchali, F., Steiner, F., Böcherer, G., Schmalen, L., Schulte, P., and Idler, W., *Rate adaptation and reach increase by probabilistically shaped 64-QAM: An experimental demonstration*, J. Lightw. Technol. 34, pp. 1599–1609 (2016)
 - [9] IEC 61280-2-8, *Fibre optic communication subsystem test procedures – Part 2-8: Digital systems – Determination of low BER using Q-factor measurements*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	27
INTRODUCTION.....	29
1 Domaine d'application	30
2 Références normatives	30
3 Termes et définitions	30
4 Contexte et terminologie.....	33
4.1 Généralités	33
4.2 Signaux vectoriels modulés.....	33
4.3 Diagramme de constellation	34
4.4 Normalisation de la constellation de référence	35
4.5 Mise à l'échelle des vecteurs mesurés	36
4.6 Amplitude du vecteur d'erreur des symboles individuels.....	36
4.7 EVM efficace	37
4.8 Calcul du facteur d'échelle	38
4.9 Calcul du facteur d'échelle par itération	39
4.10 EVM pour signaux multiplexés en polarisation	41
5 Procédures de mesure de l'EVM.....	41
5.1 Appareillage.....	41
5.2 Préparation des échantillons de données.....	41
5.3 Calcul de l'EVM efficace	42
5.3.1 Généralités	42
5.3.2 Procédure avec des états de référence connus.....	42
5.3.3 Procédure avec des états de référence inconnus.....	43
5.4 Rapport.....	43
Annexe A (informative) Relation entre l'EVM efficace et le facteur Q.....	44
Bibliographie.....	49
Figure 1 – Diagrammes de constellation des symboles QPSK et MAQ-16 mesurés.....	35
Figure 2 – Amplitude du vecteur d'erreur $D(k)$ d'un symbole QPSK unique.....	37
Figure A.1 – Histogrammes en phase et en quadrature d'un signal QPSK.....	46
Figure A.2 – Histogrammes en phase et en quadrature d'un signal MAQ-16	47
Tableau A.1 – Paramètres du facteur Q pour un signal QPSK.....	46
Tableau A.2 – Paramètres du facteur Q pour un signal MAQ-16	48

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**PROCÉDURES D'ESSAI DES SOUS-SYSTÈMES
DE TÉLÉCOMMUNICATION FIBRONIQUES –****Partie 2-13: Systèmes numériques –
Mesure de l'amplitude du vecteur d'erreur****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. À 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'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de propriété revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevet.

L'IEC 61280-2-13 a été établie par le sous-comité 86C: Systèmes et dispositifs actifs à fibres optiques, du comité d'étude 86 de l'IEC: Fibres optiques. Il s'agit d'une Norme internationale.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
86C/1900/CDV	86C/1924/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications/.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61280, publiées sous le titre général *Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunication fibroniques*, se trouve sur le site Web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-2-13:2024

INTRODUCTION

L'amplitude du vecteur d'erreur (EVM) est un paramètre unique, à valeur réelle, qui caractérise la qualité des signaux modulés par déplacement d'amplitude et de phase à n états (MDAP- n), qui sont également appelés "signaux vectoriels modulés". De façon similaire au facteur Q utilisé pour les signaux optiques modulés en intensité et directement détectés, elle mesure les écarts moyens des états des signaux transmis par rapport à leurs valeurs idéales. Ces écarts peuvent être dus au bruit et aux distorsions linéaires et non linéaires de la forme d'onde. L'EVM est donc une grandeur utile pour caractériser la qualité des signaux d'entrée ou de sortie d'un système de transmission [1]¹.

Bien que l'EVM soit souvent fournie par les analyseurs de modulation optique du commerce, il n'existe que très peu de normes qui définissent une procédure permettant de calculer l'EVM des signaux optiques.

La Recommandation G.698.2 de l'UIT-T [2], par exemple, spécifie une valeur d'EVM maximale pour les signaux QPSK à 100 Gbit/s multiplexés en polarisation, générés par un émetteur optique à l'entrée d'un système de transmission DWDM. Ces recommandations fournissent des instructions détaillées pour les étapes de traitement du signal numérique qui doivent être mises en œuvre sur le signal reçu avant de calculer l'EVM. Les étapes comprennent la suppression des déphasages et des décalages de fréquence non désirés, le filtrage spectral, la suppression du décalage en continu, et même l'ajout de bruit artificiel au signal.

De même, l'Accord de mise en œuvre OIF OIF-400ZR-01.0 [3] décrit un ensemble d'étapes de traitement du signal permettant de déterminer l'EVM dans les signaux MAQ-16 à 400 Gbit/s multiplexés en polarisation, qui comprennent l'ajout de bruit artificiel, mais il ne spécifie pas de valeur d'EVM maximale pour les signaux transmis à l'entrée du système de transmission.

Les étapes détaillées de traitement du signal définies dans la Recommandation G.698.2 de l'UIT-T et dans l'OIF-400ZR-01.0 sont spécifiques aux formats de modulation particuliers et aux applications envisagées dans ces documents. Elles ne sont pas applicables aux signaux MDAP- n arbitraires ou aux autres applications.

Le présent document spécifie une procédure générale pour calculer l'EVM des signaux MDAP- n optiques à partir d'un ensemble de symboles transmis et correctement reçus. Il ne spécifie aucune étape de traitement du signal nécessaire pour extraire les symboles des signaux bruts reçus ni aucune étape de traitement facultative ayant un impact sur la qualité du signal. Le présent document définit en revanche la normalisation des états de référence utilisés dans les calculs d'EVM, ainsi qu'une procédure pour mettre correctement à l'échelle les états de signaux mesurés. Il est destiné à servir de référence aux vendeurs d'instruments, aux fabricants de matériel de transmission et aux utilisateurs de tels instruments et matériel de transmission.

Les procédures décrites dans le présent document s'appliquent aux signaux optiques à polarisation unique ainsi qu'aux signaux multiplexés en polarisation conventionnels avec des tributaires de polarisation modulés de façon indépendante, qui sont souvent appelés "signaux codés en 3D". En général, il est déconseillé d'appliquer ces procédures sans modifier les signaux codés en 4D, dans lesquels l'amplitude optique, la phase et l'état de polarisation sont simultanément modulés pour coder les données [4]. Au moment de la rédaction du présent document, les procédures de calcul de l'EVM pour les signaux codés en 4D étaient encore à l'étude.

1 Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

PROCÉDURES D'ESSAI DES SOUS-SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION FIBRONIQUES –

Partie 2-13: Systèmes numériques – Mesure de l'amplitude du vecteur d'erreur

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61280-2 définit une procédure pour calculer la valeur efficace de l'amplitude du vecteur d'erreur des signaux MDAP- n optiques à partir d'un ensemble de symboles mesurés. Elle définit spécifiquement la normalisation des états de référence ainsi qu'une procédure de mise à l'échelle optimale des états de symboles mesurés.

La procédure décrite dans le présent document s'applique aux signaux optiques à polarisation unique ainsi qu'aux signaux multiplexés en polarisation conventionnels avec des tributaires de polarisation modulés de façon indépendante. En général, il est déconseillé d'appliquer ces procédures sans modifier les signaux dans lesquels l'amplitude optique, la phase et l'état de polarisation sont simultanément modulés pour coder les données.

Le présent document ne spécifie aucune étape de traitement du signal permettant d'extraire les symboles des signaux optiques reçus, car ces étapes dépendent du récepteur optique et peuvent varier selon le type du signal MDAP- n transmis. Ces étapes de traitement du signal ainsi des étapes supplémentaires facultatives sont définies dans les documents spécifiques à chaque application.

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

3.1

modulation numérique

modulation d'une porteuse sinusoïdale optique par un signal numérique

Note 1 à l'article: La modulation numérique prend généralement la forme de modulation par changement d'amplitude, de modulation par déplacement de fréquence, de modulation par déplacement de phase ou leur combinaison.

[SOURCE: IEC 60050-713:1998, 713-07-12, modifié – adjectif "optique" ajouté].]

3.2

signal (numérique) binaire

signal numérique dont chaque élément de signal peut prendre l'une de deux valeurs discrètes admises

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-16-03]

3.3

signal (numérique) n -aire

signal numérique dont chaque élément de signal peut prendre l'une de n valeurs discrètes admises

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-16-05]

3.4

modulation par déplacement d'amplitude et de phase à n états

MDAP- n

modulation numérique dans laquelle chaque élément d'un signal modulant est représenté par l'une de n combinaisons déterminées de la phase et de l'amplitude d'une oscillation sinusoïdale

[SOURCE: IEC 60050-713:1998, 713-07-13, modifié – Note 1 à l'article supprimée.]

3.5

modulation par quadrature de phase

QPSK

modulation tétravalente de phase

modulation par déplacement de phase où le déplacement de phase prend quatre valeurs multiples de 90°

Note 1 à l'article: L'abréviation "QPSK" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Quadrature Phase Shift Keying".

[SOURCE: IEC 60050-702:2018, 702-06-43]

3.6

modulation d'amplitude en quadrature à n états

MAQ- n

modulation par déplacement d'amplitude et de phase à n états que l'on peut obtenir en appliquant une modulation par changement d'amplitude à deux porteuses en quadrature et en ajoutant les modulats

Note 1 à l'article: Dans certains cas, n est égal à 2^{2p} , où p est un entier, et les points de la constellation forment un carré (par exemple pour une MAQ- n carrée).

[SOURCE: IEC 60050-713:1998, 713-07-14, modifié – Note 1 à l'article ajoutée.]

3.7

constellation (en modulation numérique)

configuration de n points représentant graphiquement dans un diagramme amplitude-phase un signal modulé dans une modulation par déplacement d'amplitude et de phase à n états

Note 1 à l'article: La constellation est souvent tracée dans un diagramme IQ à deux dimensions, dans lequel les deux axes représentent les composantes en phase et en quadrature des signaux modulés par déplacement d'amplitude et de phase.

[SOURCE: IEC 60050-713:1998, 713-07-15, modifié – Note 1 à l'article ajoutée.]

3.8

signal à transmettre

signal d'entrée (d'un système de transmission)

signal appliqué à un accès d'entrée du terminal d'émission d'un système de transmission

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-04-11]

3.9

signal de référence (d'un système de transmission)

version idéale sans distorsion du signal à transmettre

3.10

signal restitué

signal de sortie (d'un système de transmission)

signal apparaissant à un accès de sortie du terminal de réception d'un système de transmission

Note 1 à l'article: Un signal restitué doit idéalement reproduire sans distorsion le signal à transmettre correspondant.

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-04-12]

3.11

transmission multiplex en polarisation

(transmission par) multiplexage en polarisation

méthode de transmission employant un multiplexage de deux signaux à polarisation orthogonale à l'entrée d'un trajet de transmission et le démultiplexage correspondant à la sortie

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-08-09, modifié – qualificatif "en polarisation" ajouté au terme; mention "de deux signaux à polarisation orthogonale" ajoutée dans la définition.]

3.12

circuit de décision (en transmission numérique)

dispositif qui décide de la valeur probable d'un élément de signal d'un signal numérique reçu

[SOURCE: IEC 60050-704:1993, 704-16-12]

3.13

symbole (en modulation numérique)

l'un des n états d'un signal modulé dans une modulation par déplacement d'amplitude et de phase à n états

3.14

amplitude du vecteur d'erreur

EVM

différence entre le signal mesuré et une référence

Note 1 à l'article: Une référence est un signal parfaitement modulé.

Note 2 à l'article: L'abréviation "EVM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Error Vector Magnitude".

[SOURCE: ISO/IEC 24769-2:2013, 3.1.1]

3.14.1**valeur efficace de l'amplitude du vecteur d'erreur** **E_{rms}** E_{rms} moyenne quadratique des amplitudes du vecteur d'erreur de N symboles d'un signal MDAP- n

Note 1 à l'article: La valeur de l'EVM efficace est supérieure à zéro et généralement exprimée en pourcentage.

4 Contexte et terminologie**4.1 Généralités**

L'Article 4 fournit des informations contextuelles sur les calculs d'EVM et définit la terminologie utilisée dans le présent document.

L'amplitude du vecteur d'erreur (EVM) est un paramètre unique, à valeur réelle, qui mesure les écarts moyens des différents états des signaux modulés par déplacement d'amplitude et de phase à n états (MDAP- n) par rapport à leurs valeurs idéales. Sa valeur est nulle pour un signal MDAP- n idéal et supérieure à zéro pour les signaux MDAP- n réels (c'est-à-dire déformés). L'EVM est fréquemment exprimée en pourcentage.

Souvent, les signaux MDAP- n sont également appelés "signaux vectoriels modulés" (voir 4.2) car ils peuvent être représentés sous forme de vecteurs dans un diagramme de constellation bidimensionnel, tel que décrit en 4.3. L'EVM moyenne d'un signal transmis est déterminée à partir d'un nombre de symboles transmis relativement élevé (par exemple plus de 1 000 symboles) en calculant d'abord individuellement l'écart entre l'état transmis (c'est-à-dire l'état mesuré) et l'état idéal correspondant pour chaque symbole transmis, tel que décrit en 4.6, puis en établissant la moyenne quadratique de ces écarts individuels, tel que décrit en 4.7.

La grandeur résultante est généralement appelée "EVM efficace", abrégée en EVM RMS ou E_{rms} . L'EVM efficace peut être assimilée à une généralisation du facteur Q, qui est souvent utilisé pour caractériser la qualité des signaux binaires et n -aires modulés en intensité. En fait, l'EVM efficace et le facteur Q sont étroitement liés, tel que décrit à l'Annexe A.

Les éléments importants du calcul de l'EVM sont la normalisation des états de référence, qui est spécifiée en 4.4, et la mise à l'échelle des états mesurés, qui est spécifiée en 4.5 et 4.8.

4.2 Signaux vectoriels modulés

En général, les signaux vectoriels modulés sont constitués d'une composante en phase, caractérisée par une amplitude variable dans le temps $A_I(t)$, et d'une composante en quadrature, caractérisée par une amplitude variable dans le temps $A_Q(t)$. Les deux composantes sont modulées sur la même fréquence porteuse optique, la phase optique de la composante en quadrature étant décalée de 90° par rapport à la composante en phase. Par conséquent, l'amplitude optique variable dans le temps des signaux vectoriels modulés peut être représentée par une fonction complexe $A_c(t)$, comme indiqué dans la Formule (1):

$$A_c(t) = \sqrt{P_S} \left[A_I(t) + jA_Q(t) \right] e^{j[\omega_s t + \varphi_s(t)]} \quad (1)$$

où

 P_S est la puissance optique moyenne du signal; $A_I(t)$ est la composante en phase du signal modulé; $A_Q(t)$ est la composante en quadrature du signal modulé;

$\omega_s = 2\pi f_s$ est la fréquence angulaire du signal optique non modulé (c'est-à-dire de la porteuse optique);

$\varphi_s(t)$ représente des variations supplémentaires de la phase optique.

NOTE 1 Dans la Formule (1), les amplitudes $A_I(t)$ et $A_Q(t)$ sont normalisées de telle sorte que la moyenne dans le temps $\langle A_I^2(t) + A_Q^2(t) \rangle$ soit égale à 1. Cette normalisation est différente de celle utilisée pour calculer l'EVM.

De manière équivalente, $A_c(t)$ peut être représenté par un vecteur bidimensionnel $\mathbf{A}_v(t)$, comme indiqué dans la Formule (2), où $A_I(t)$ et $A_Q(t)$ définissent les composantes de ce vecteur.

$$\mathbf{A}_v(t) = \sqrt{P_s} \begin{bmatrix} A_I(t) \\ A_Q(t) \end{bmatrix} e^{j[\omega_s t + \varphi_s(t)]} \quad (2)$$

En modulation par quadrature de phase (QPSK), par exemple, $A_I(t)$ et $A_Q(t)$ sont des signaux modulés en amplitude binaires indépendants (dont les périodes de symboles sont correctement synchronisées), alors qu'en modulation d'amplitude en quadrature à 16 états (MAQ-16), $A_I(t)$ et $A_Q(t)$ sont tous deux des signaux modulés en amplitude quaternaires.

NOTE 2 Les signaux vectoriels modulés sont souvent générés par deux modulateurs d'amplitude optique indépendants (par exemple des modulateurs de Mach-Zehnder) qui sont raccordés en parallèle à la même source lumineuse et fonctionnent de manière à retarder la phase optique de l'un des modulateurs de 90° par rapport à celle de l'autre modulateur. L'IEC TR 61282-16 [6] fournit de plus amples informations sur la génération et la détection des signaux vectoriels modulés.

4.3 Diagramme de constellation

Les composantes variables dans le temps $A_I(t)$ et $A_Q(t)$ d'un signal vectoriel modulé peuvent être tracées dans un graphique bidimensionnel, d'après la Formule (2). Très souvent, l'abscisse représente la composante en phase $A_I(t)$ et l'ordonnée la composante en quadrature $A_Q(t)$. En général, ces tracés n'affichent qu'une seule paire de valeurs d'amplitude $[A_I(t_k), A_Q(t_k)]$ pour chaque symbole transmis, ce qui correspond à un vecteur d'état bidimensionnel $\mathbf{S}(k)$, tel qu'indiqué dans la Formule (3):

$$\mathbf{S}(k) = \begin{bmatrix} A_I(t_k) \\ A_Q(t_k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

où

k est un entier, avec $k = 1, 2, 3, \dots, N$.

L'instant t_k auquel les amplitudes $A_I(t)$ et $A_Q(t)$ sont échantillonnées doit être choisi de manière à représenter au mieux l'état du symbole MDAP- n transmis. Toutefois, aucune décision ne doit être prise quant à la valeur probable du symbole transmis (c'est-à-dire que les échantillons doivent être prélevés avant un circuit de décision). De plus, les amplitudes des signaux de tous les symboles analysés doivent être échantillonnées à la même position dans chaque période de symbole T_s , de telle sorte que tous les temps d'échantillonnage soient espacés d'un multiple entier de T_s , comme décrit par la Formule (4):

$$t_k = k T_s + \Delta t \quad (4)$$

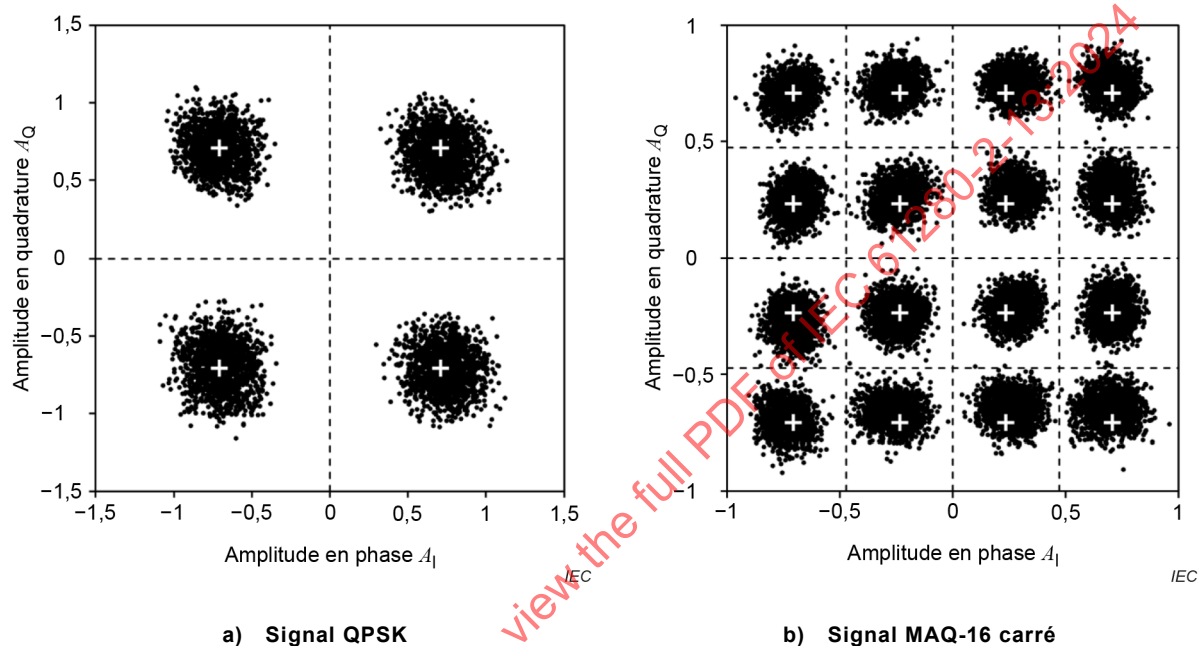
où

Δt est le décalage temporel dans chaque période de symbole;

k est un entier, avec $k = 1, 2, 3, \dots, N$.

Le diagramme de dispersion des vecteurs d'état $S(k)$ d'un signal vectoriel modulé est appelé "diagramme de constellation". La Figure 1 représente les diagrammes de constellation de deux signaux MDAP- n couramment utilisés: un signal QPSK transmis et un signal MAQ-16 carré transmis.

NOTE Les amplitudes de signaux représentées à la Figure 1 sont mises à l'échelle selon les procédures décrites en 4.5 et en 4.8.



Légende

Points noirs pleins	États de signaux mesurés (mis à l'échelle comme décrit en 4.5 et 4.8)
Croix blanches	États de référence (voir 4.4)
Lignes de tirets	Points médians entre les composantes en phase et en quadrature des états de référence

Figure 1 – Diagrammes de constellation des symboles QPSK et MAQ-16 mesurés

4.4 Normalisation de la constellation de référence

La constellation d'un signal MDAP- n idéal est représentée par n points différents dans le diagramme de constellation, qui correspondent à n vecteurs de référence différents $\mathbf{R}(m)$, $m = 1, 2, \dots, n$. Les vecteurs de référence doivent être normalisés de telle sorte que le plus long vecteur ait la longueur unitaire, comme indiqué dans la Formule (5):

$$\max_{m=1, \dots, n} \{|\mathbf{R}(m)|\} = 1 \quad (5)$$

Les états de référence sont sans unité.

NOTE Les états de référence sont parfois normalisés de telle sorte que la puissance moyenne de tous les états de référence possibles soit égale à un, c'est-à-dire que $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathbf{R}(i)|^2 = 1$. Cette normalisation est souvent utilisée

dans les calculs d'EVM des signaux MDAP- n électriques [5]. Pour les signaux QPSK, elle est identique à la normalisation spécifiée en 4.4, mais pour les signaux MDAP- n de cardinalité plus élevée, tels que les signaux MAQ-16, les deux normalisations conduisent à des valeurs d'EVM sensiblement différentes [1]. La normalisation définie dans le présent document est couramment utilisée pour les signaux optiques et est identique à celle utilisée dans l'OIF-400ZR-01.0 [3].

4.5 Mise à l'échelle des vecteurs mesurés

La mise à l'échelle des vecteurs d'états mesurés $\mathbf{S}(k)$ du signal MDAP- n transmis est généralement différente de celle des vecteurs de référence $\mathbf{R}(m)$. L'établissement d'une comparaison utile entre $\mathbf{S}(k)$ et $\mathbf{R}(m)$ passe par une remise à l'échelle des états mesurés $\mathbf{S}(k)$, c'est-à-dire leur multiplication par un facteur d'échelle commun α . Cette mise à l'échelle est perturbée par le fait que les vecteurs d'états $\mathbf{S}(k)$ sont généralement dispersés autour des points de constellation idéaux et peuvent même présenter des décalages importants par rapport à ces points. Comme l'EVM caractérise l'écart des vecteurs d'états mesurés $\mathbf{S}(k)$ par rapport à leurs états idéaux $\mathbf{R}(m)$, le facteur d'échelle optimal α est celui qui limite le plus les écarts moyens des vecteurs d'états mis à l'échelle $\alpha\mathbf{S}(k)$ par rapport aux vecteurs de référence associés $\mathbf{R}[m(k)]$, pour tous $k = 1, \dots, N$. Le calcul du facteur d'échelle optimal est spécifié en 4.8 et 4.9.

Les vecteurs d'états mis à l'échelle sont représentés par $\mathbf{S}_\alpha(k) = \alpha \mathbf{S}(k)$, où α est le facteur d'échelle commun.

4.6 Amplitude du vecteur d'erreur des symboles individuels

Pour calculer l'EVM du signal mesuré, chacun des vecteurs d'états mesurés $\mathbf{S}_\alpha(k)$ est associé à un vecteur de référence $\mathbf{R}(m)$ à partir de l'ensemble des n états possibles, idéalement avec le vecteur de référence transmis.

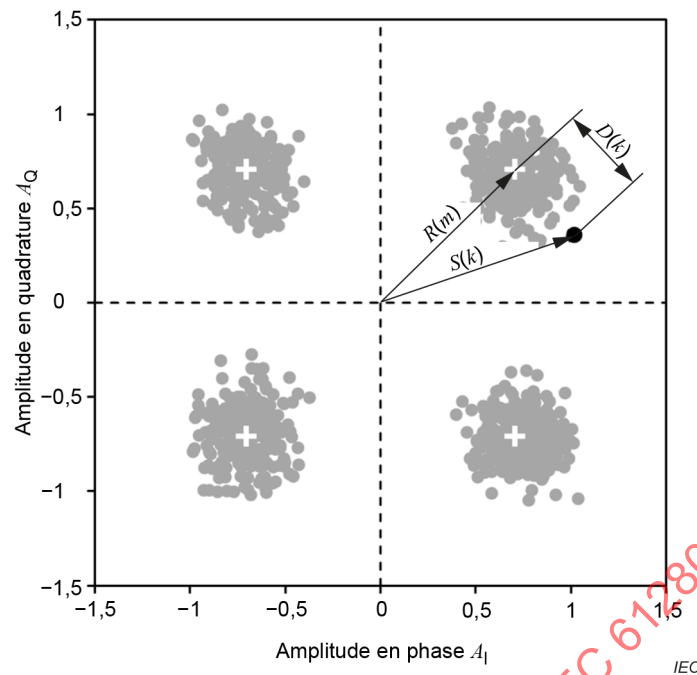
Si la séquence des états de référence transmis est connue, ce qui est le cas lorsqu'un signal d'essai bien défini a été transmis, les vecteurs de référence peuvent être déterminés à partir de cette séquence en établissant une corrélation correcte entre les symboles reçus et les états transmis. Si les états transmis sont inconnus, ce qui est souvent le cas, chaque $\mathbf{S}_\alpha(k)$ est associé au vecteur de référence $\mathbf{R}(m)$ qui est le plus proche de $\mathbf{S}_\alpha(k)$ dans le diagramme de constellation.

NOTE Pour les signaux avec seulement quelques n états possibles (par exemple pour les signaux QPSK), il est souvent plus simple d'associer un état mesuré à l'état de référence transmis. Cependant, cette association devient de plus en plus difficile à mesure que le nombre d'états n augmente, en particulier lorsque le signal mesuré est bruyant ou déformé d'une autre manière. Les états associés de façon incorrecte conduisent généralement à une sous-estimation de l'EVM. Toutefois, le nombre d'états incorrectement associés est généralement nettement plus petit que celui des états correctement associés (par exemple en raison de la distribution exponentielle du bruit), de telle sorte que l'impact sur l'EVM efficace peut être ignoré dans de nombreux cas.

L'association de chaque $\mathbf{S}_\alpha(k)$ à un $\mathbf{R}(m)$ correspondant établit ainsi une relation entre k et m , qui peut être décrite par une fonction $m(k)$, de telle sorte que chaque vecteur d'état mesuré $\mathbf{S}(k)$ soit associé à un vecteur de référence $\mathbf{R}[m(k)]$.

L'EVM du k -ème symbole reçu est donnée par la distance $D(k)$ entre $\mathbf{S}_\alpha(k)$ et $\mathbf{R}[m(k)]$, telle que décrite par la Formule (6) et représentée à la Figure 2.

$$D(k) = \left| \mathbf{S}_\alpha(k) - \mathbf{R}[m(k)] \right| \quad (6)$$



Légende

Points gris pleins États de signaux mesurés

Point noir plein État de signal choisi pour lequel $D(k)$ est calculé

Croix blanches États de référence

Figure 2 – Amplitude du vecteur d'erreur $D(k)$ d'un symbole QPSK unique

4.7 EVM efficace

L'amplitude moyenne du vecteur d'erreur E_{rms} de tous les symboles transmis est donnée par la moyenne quadratique de tous les $D(k)$, $k = 1, \dots, N$, comme indiqué dans la Formule (7):

$$E_{\text{rms}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N |S_a(k) - \mathbf{R}[m(k)]|^2} \quad (7)$$

Ce paramètre est souvent appelé "valeur efficace de l'amplitude du vecteur d'erreur" et abrégé en EVM RMS ou EVM_{rms} .

Pour obtenir des résultats plus précis, il convient de collecter un nombre N de symboles élevé. Il convient de représenter chacun des états possibles du signal MDAP- n avec la même probabilité que celle attendue lorsque le système de transmission fonctionne normalement. Pour les signaux avec une répartition équiprobable de tous les états possibles, il convient de collecter au moins 100 symboles pour chaque état. Pour les signaux présentant une constellation de forme probabiliste [8], il convient de représenter les états de l'ensemble de symboles analysé selon la fonction de probabilité prescrite pour les symboles. Les signaux d'essai de conception particulière sont parfois transmis pour la mesure de l'EVM, afin d'assurer la distribution souhaitée des symboles transmis ainsi que la randomisation de l'ordre dans lequel ils sont transmis. Une fois les symboles collectés, leur EVM peut être évaluée dans un ordre arbitraire. Si nécessaire, les symboles peuvent être collectés en plusieurs mesures indépendantes.

L'EVM efficace des symboles QPSK représentés dans l'exemple de la Figure 1 a) est de 17 %, alors que l'EVM efficace des symboles MAQ-16 à la Figure 1 b) n'est que de 8,6 %. Dans les deux cas, le calcul de l'EVM comprend 64 000 symboles.

4.8 Calcul du facteur d'échelle

Comme expliqué en 4.5, les vecteurs d'états mesurés $S(k)$ sont mis à l'échelle de telle sorte que les écarts entre les vecteurs d'états mis à l'échelle $S_a(k) = \alpha S(k)$ et leurs vecteurs de référence associés soient minimales. Une mise à l'échelle appropriée est nécessaire pour éviter les décalages non désirés de E_{rms} . Le facteur d'échelle α doit être calculé à partir des états mesurés et de leurs états de référence associés, comme indiqué dans la Formule (8):

$$\alpha = \frac{\sum_{k=1}^N |R[m(k)]|^2}{\sum_{k=1}^N S(k) \cdot R[m(k)]} \quad (8)$$

où " $\cdot$ " désigne le produit vectoriel scalaire.

Pour les signaux avec une distribution équiprobable de tous les n états de signaux possibles, la Formule (8) peut être approximée par la Formule (9).

$$\alpha = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R(i)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S(k) \cdot R[m(k)]} \quad (9)$$

Pour les signaux à constellation de forme probabiliste, la Formule (8) peut être approximée par la Formule (10):

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n p(i) |R(i)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S(k) \cdot R[m(k)]} \quad (10)$$

où

$p(i)$ est la probabilité de transmission du symbole de référence i , avec $\sum_{i=1}^n p(i) = 1$.

NOTE 1 Pour les signaux avec une distribution équiprobable de tous les états possibles, $p(i) = 1/n$, pour $i = 1, \dots, n$, la Formule (10) devient la Formule (9).

Le facteur d'échelle α de la Formule (8) est obtenu en mettant à l'échelle tous les vecteurs de référence $R(m)$ avec un facteur commun β , dont la valeur est choisie de manière à réduire le plus possible la distance efficace D_{rms} entre $S(k)$ et $\beta R(m)$, où D_{rms} est défini dans la Formule (11).

$$D_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{S}(k) - \beta \mathbf{R}[m(k)]|^2} \quad (11)$$

La valeur souhaitée de β peut être calculée analytiquement à partir de la condition $\partial D_{\text{rms}} / \partial \beta = 0$, qui donne $\beta = 1/\alpha$, où α est donné par la Formule (8).

NOTE 2 En général, il n'est pas possible de calculer le facteur d'échelle optimal α directement à partir de la Formule (6) en réduisant le plus possible E_{rms} , car α met à l'échelle non seulement le centroïde des vecteurs d'états mesurés, mais aussi le bruit ajouté et les distorsions de forme d'onde, ce qui peut introduire un décalage significatif de E_{rms} .

Lorsque la séquence des états (idéaux) transmis est connue et correctement corrélée avec celle des symboles reçus, tous les états de référence $\mathbf{R}[m(k)]$ peuvent être déterminés a priori, de telle sorte que le facteur d'échelle souhaité α peut être directement calculé à partir de la Formule (8).

Lorsque les symboles reçus sont inconnus, α ne peut pas être calculé à partir de la Formule (8) tant que chaque état mesuré $\mathbf{S}(k)$ n'est pas associé à un état de référence correspondant $\mathbf{R}(m)$, tel que décrit en 4.6. Comme $\mathbf{S}(k)$ doit être associé à l'état de référence $\mathbf{R}(m)$ le plus proche de l'état mis à l'échelle $\mathbf{S}_\alpha(k)$, le facteur d'échelle α doit généralement être connu avant de pouvoir calculer α à partir de la Formule (8). Dans ce cas, α doit être déterminé à l'aide de la procédure itérative décrite en 4.9.

NOTE 3 Pour les signaux avec très peu d'états possibles, tels que les signaux QPSK, il est possible d'affecter directement les états de référence aux états mesurés sans mise à l'échelle préalable. Pour les signaux QPSK, par exemple, tous les états mesurés trouvés dans un quadrant donné sont affectés du seul et unique état de référence de ce quadrant. Dans ce cas, α peut être calculé directement à partir de la Formule (8).

4.9 Calcul du facteur d'échelle par itération

La procédure de calcul d'alpha par itération décrite en 4.9 n'est exigée que lorsque les symboles transmis sont inconnus. La procédure débute par une première estimation approximative du facteur d'échelle souhaité, appelé α_1 , qui est utilisée comme première approche pour mettre à l'échelle les vecteurs d'états mesurés. Pour les signaux avec une répartition équiprobable de tous les états de signaux possibles, une première estimation de α peut être obtenue à partir de la racine carrée du rapport de la puissance moyenne de tous les états de référence $\mathbf{R}(m)$ sur la puissance moyenne de tous les symboles mesurés $\mathbf{S}(k)$, comme indiqué dans la Formule (12):

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathbf{R}(i)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{S}(k)|^2}} \quad (12)$$

Pour les signaux à constellations de forme probabiliste, les états de référence doivent être pondérés par leur probabilité d'occurrence dans le signal transmis, comme indiqué dans la Formule (13):

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p(i) |\mathbf{R}(i)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{S}(k)|^2}} \quad (13)$$

où

$p(i)$ est la probabilité de transmission du symbole de référence i , avec $\sum_{i=1}^n p(i) = 1$.

NOTE 1 Pour les signaux avec une répartition équiprobable de tous les états possibles, où $p(i) = 1/n$, pour $i = 1, \dots, n$, la Formule (13) est identique à la Formule (12). Par conséquent, la Formule (13) est une forme généralisée de la Formule (12). La première estimation de la Formule (13) est la plus précise pour les signaux présentant des distorsions de forme d'onde et un bruit relativement faibles. Pour les signaux bruyants, une estimation plus précise du facteur d'échelle peut souvent être obtenue en analysant la distribution des symboles échantillonnés dans le diagramme de constellation. Dans le cas de signaux MAQ- n carrés, par exemple, le facteur d'échelle peut être obtenu à partir des histogrammes des composantes en phase et en quadrature des états de signaux mesurés, comme représenté à la Figure A.2 pour un signal MAQ-16. Si les distorsions de forme d'onde dans le signal sont faibles, α_1 peut être obtenu à partir de la distance entre les deux pics les plus à l'extérieur, $D_{\text{out}} = |\mu_4 - \mu_1|$, de sorte que $\alpha_1 = \sqrt{2}/D_{\text{out}}$. Des estimations plus précises peuvent être utilisées pour les signaux fortement déformés. Cependant, les méthodes sont généralement spécifiques à un format de modulation particulier et, par conséquent, ne peuvent pas être facilement généralisées à des signaux MDAP- n arbitraires.

Une fois la première estimation α_1 déterminée, la procédure suivante doit être appliquée.

- Mettre à l'échelle les vecteurs d'états mesurés avec $\mathbf{S}_{\alpha_1}(k) = \alpha_1 \mathbf{S}(k)$, en utilisant le facteur d'échelle initial α_1 .
- Pour chaque symbole k , trouver l'état de référence $\mathbf{R}(m)$ le plus proche de $\mathbf{S}_{\alpha_1}(k)$ (voir 4.6), afin d'obtenir une première relation entre m et k , notée $m_1(k)$.
- Calculer α à partir de la Formule (8), en utilisant $m(k) = m_1(k)$ à partir de l'étape b), afin d'obtenir un facteur d'échelle α_2 amélioré.
- Remettre à l'échelle les vecteurs d'états mesurés avec $\mathbf{S}_{\alpha_2}(k) = \alpha_2 \mathbf{S}(k)$, en utilisant la valeur α_2 de l'étape c).
- Pour chaque symbole k , trouver l'état de référence $\mathbf{R}(m)$ le plus proche de $\mathbf{S}_{\alpha_2}(k)$ (voir 4.6), ce qui donne une seconde relation entre m et k , notée $m_2(k)$.
- Répéter les étapes c) à e) jusqu'à ce que la différence entre α_l et α_{l-1} ne soit plus significative.
- Calculer l'EVM $D(k)$ pour chaque symbole k , en utilisant $m_l(k)$ et $\mathbf{S}_{\alpha_l}(k)$ de la dernière itération des étapes d) et e) de la Formule (5).

NOTE 2 Si le signal transmis est déformé par un bruit excessif ou d'autres distorsions de forme d'onde, il se peut que l'état de référence le plus proche d'un symbole transmis ne corresponde pas à son état idéal. Dans ce cas, la distance calculée à partir de la Formule (5) est plus petite que si l'état de référence correspondant était connu, ce qui entraîne une sous-estimation de l'EVM efficace. Ce problème n'est pas rencontré lorsque les états de référence des signaux transmis sont connus.

4.10 EVM pour signaux multiplexés en polarisation

Dans les signaux multiplexés en polarisation, deux signaux MDPA- n différents sont transmis, de manière simultanée ou alternée, dans deux états de polarisation orthogonaux. Les signaux correspondant à ces deux états sont généralement appelés "signaux polarisés selon X" et "signaux polarisés selon Y". Dans ce cas, les symboles transmis doivent être mesurés et traités séparément pour les signaux polarisés selon X et Y, de manière à obtenir deux valeurs d'EVM efficace. Si les signaux polarisés selon X et Y ont des états de référence $\mathbf{R}(m)$ identiques, la moyenne quadratique des deux valeurs d'EVM peut être calculée pour obtenir une seule valeur d'EVM efficace.

5 Procédures de mesure de l'EVM

5.1 Appareillage

Un récepteur optique linéaire doit être utilisé pour convertir les signaux optiques à analyser en signaux électriques. La largeur de bande optique et électrique du récepteur doit être suffisante pour capturer la totalité du spectre du signal transmis. Les signaux électriques analogiques reçus doivent être convertis en signaux numériques, en utilisant des convertisseurs analogiques-numériques, et enregistrés sous forme de données numériques pour permettre un traitement et une analyse ultérieurs des signaux.

NOTE Les analyseurs de modulation optique et les récepteurs de télécommunication correctement étalonnés du commerce sont des récepteurs optiques appropriés. Les signaux optiques MDPA- n sont fréquemment détectés avec des récepteurs cohérents intradynes présentant une diversité de phase et de polarisation [7]. Ces récepteurs produisent généralement quatre signaux électriques analogiques, à partir desquels les symboles transmis peuvent être récupérés par différentes étapes de traitement du signal, comme décrit plus en détail dans l'IEC TR 61282-16 [6]. Les étapes peuvent être réalisées avec des processeurs de signaux numériques matériels ou logiciels.

5.2 Préparation des échantillons de données

Les données enregistrées obtenues du récepteur optique doivent être traitées de telle sorte que les signaux électriques représentent les symboles transmis du signal optique de façon optimale. Cela signifie qu'il convient de les corriger pour tenir compte de toute distorsion linéaire et non linéaire introduite dans le récepteur, notamment:

- a) l'amplitude et la phase de la dépendance à la fréquence du récepteur (baisse de fréquence, par exemple);
- b) les déséquilibres entre les composantes en phase et en quadrature du signal reçu;
- c) les retards (c'est-à-dire les écarts) entre les composantes en phase et en quadrature du signal;
- d) les erreurs de phase entre les composantes en phase et en quadrature reçues;
- e) les déphasages et les décalages de fréquence variables dans le temps des signaux;
- f) la réponse non linéaire des photorécepteurs et des convertisseurs analogiques-numériques.

NOTE Les déphasages et les décalages de fréquence variables dans le temps sont généralement déterminés et corrigés sur des sous-ensembles relativement petits de symboles transmis consécutivement (par exemple entre 10 symboles et 1 000 symboles), qui se chevauchent parfois, afin d'éliminer le bruit de phase et de fréquence laser indésirable. Le nombre de symboles dans chacun de ces sous-ensembles dépend de l'amplitude et de la vitesse des variations de fréquence et de phase attendues.

Si nécessaire, il convient également d'éliminer les distorsions de forme d'onde causées par la dispersion chromatique (y compris la prédistorsion de la dispersion chromatique dans le signal transmis), la dispersion du mode de polarisation et les pertes dépendant de la polarisation dans le trajet optique entre l'émetteur et le récepteur.