

Messungen des Fehlervektorbetrags bei 5G-NR-Signalen

Der Fehlervektorbetrag (*Error Vector Magnitude, EVM*) ist der wichtigste Parameter der Signalqualität in 5G-NR-Netzen. Bei seiner Messung dort gibt es aber Herausforderungen. Und im diese zu bewältigen, sind neue Methoden gefragt.



Eine wichtige Motivation für die Einführung einer neuen Mobilfunkgeneration war stets ein höherer Datendurchsatz für die Endbenutzer und somit eine höhere Bitrate. Bei jeder Mobilfunkgeneration wurden dazu prinzipiell die gleichen Mittel eingesetzt: größere Kanalbandbreiten kombiniert mit einem höherstufigen Modulationsverfahren. Bei einem Vergleich von LTE und 5G NR erzielt 5G NR bei identischer Kanalbandbreite aufgrund der überlegenen Modulation einen deutlich höheren Durchsatz als LTE.

Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Beide Mobilfunktechniken verwenden für die Modulation der Träger (oder genauer Unterträger) die Quadraturamplitudenmodulation (QAM).

Bei QAM werden Informationen übertragen, indem Amplitude und Phase des Trägers für verschiedene Zustände oder „Symbole“ angepasst werden. Ein Symbol entspricht dabei stets einer eindeutigen Kombination von Amplitude und Phasenverschiebung; von der Gesamtzahl der verfügbaren Symbole hängt ab, wie viele Bit mit einem einzelnen Symbol übertragen werden können. Beispielsweise lassen sich mit einem Modulationsverfahren, das auf 16 Symbolen basiert, pro Symbol 4 Bit codieren. Ein System mit 256 Symbolen kann dementsprechend 8 Bit pro Symbol übertragen.

Diese Symbole werden häufig in Form eines Konstellationsdiagramms dargestellt, in dem jedes Symbol dem Endpunkt eines

Vektors mit einem bestimmten Betrag und einer bestimmten Phase entspricht.

Die Modulationsordnung entspricht der Anzahl der möglichen Symbole – eine 16QAM-Konstellation, wie in Bild 1 gezeigt, verwendet also 16 Symbole oder Vektorendpunkte.

In der Praxis fallen die Amplituden und Phasenverschiebungen nicht exakt auf die definierten Symbolendpunkte. Diese Abweichungen können auf Betragsfehler, Phasenfehler oder (wie meistens) auf eine Kombination beider zurückzuführen sein. Falls die Amplitude und Phase des empfangenen Symbols zu stark vom idealen Punkt abweichen, wird dieses Symbol falsch decodiert: Am Empfänger tritt ein Bitfehler auf.

Fehlervektor

Zur Bestimmung dieser Differenz zwischen den idealen und gemessenen Symbolen werden die beiden Punkte mit einem

Autor:
Paul Denisowski
Ingenieur im Produktmanagement
Rohde & Schwarz
www.rohde-schwarz.de

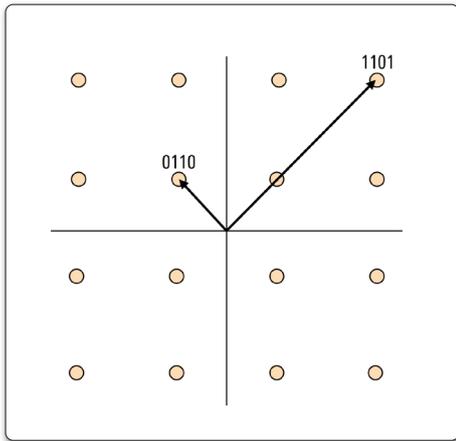


Bild 1: 16QAM-Konstellation

Fehlervektor verbunden. Wie jeder Vektor besitzt der Fehlervektor einen Betrag und eine Richtung, aber in den meisten Fällen ist lediglich der Betrag von Belang und nicht die Richtung (Bild 2). Folglich wird die Modulationsgenauigkeit als Fehlervektorbetrag (EVM) ausgedrückt. Größere EVM-Werte zeigen einen größeren Abstand zwischen den gemessenen Punkten gegenüber den jeweiligen Referenzpunkten an und bedingen somit eine höhere Bitfehlerwahrscheinlichkeit. Der EVM wird zu jedem Symbolzeitpunkt berechnet und als eine normalisierte Größe angegeben, entweder bezogen auf die maximale Leistung oder die Effektivleistung der empfangenen Signalkonstellation. Während die meisten Standards die Effektivleistung verwenden, ist beim Vergleich verschiedener EVM-Werte daher auf die Bezugsgröße zu achten.

Der EVM wird in Prozent oder Dezibel angegeben und stellt in der Regel einen statistischen Wert (Mittelwert, Maximum, Minimum usw.) für einen bestimmten Zeitraum

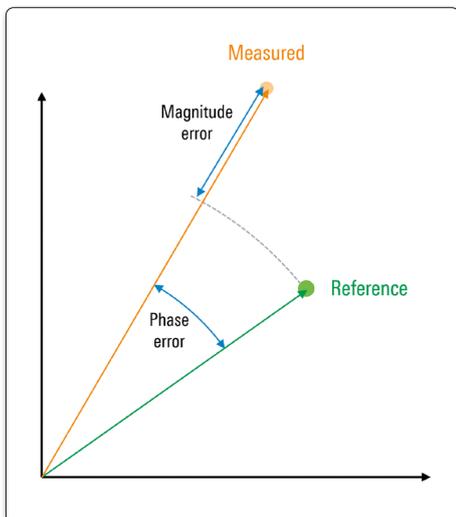


Bild 2: Fehlervektorbetrag

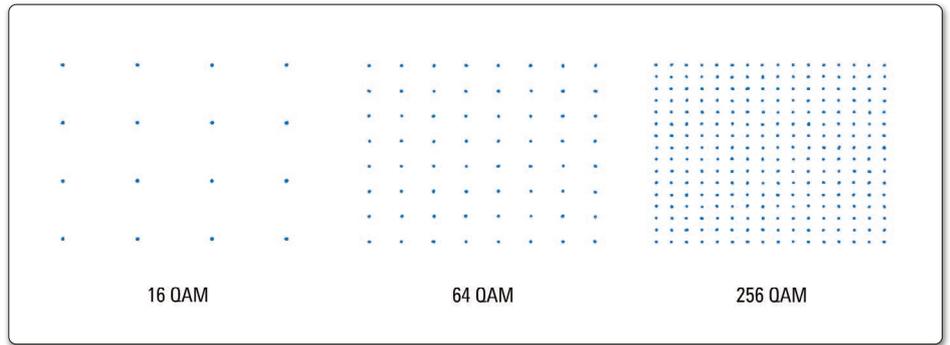


Bild 3: 16 QAM, 64 QAM und 256 QAM

dar. Der EVM kann aber auch für aufeinanderfolgende Symbole aufgezeichnet werden, damit sich überprüfen lässt, ob während einer Übertragung Schwankungen auftreten. Es werden also grundsätzlich niedrigere Werte des EVM, das heißt kleinere Prozentwerte oder niedrigere (negative) Dezibelwerte, angestrebt. Typische EVM-Werte in 5G-NR-Netzen liegen im Bereich von -40 bis -50 dB oder im einstelligen Prozentbereich.

Wenn der EVM kritisch wird

Bei höheren Modulationsordnungen gewinnt der EVM noch größere Bedeutung. Die Symbole oder Konstellationspunkte liegen dort nämlich näher beieinander. Fehler des Betrags und/oder der Phase im empfangenen Signal führen deswegen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu einer fehlerhaften Symboldecodierung. Bild 3 zeigt Konstellationsdiagramm für 16 QAM, 64 QAM und 256 QAM.

Wie bereits erwähnt, erreicht 5G NR einen höheren Durchsatz auch dadurch, dass die Mobilfunktechnik eine höherstufige QAM-Modulation verwendet, insbesondere 64 QAM und 256 QAM. Diese mehrstufigen Modulationsverfahren benötigen jedoch sowohl leistungsfähigere Sender und Empfänger als auch eine „sauberere“ HF-Umgebung. Analog zu vielen anderen Funkstandards legt 5G NR zulässige Höchstwerte für den EVM fest, die mit zunehmender Modulationsordnung immer kleinere Beträge auf-

weisen. Bei 5G NR ist für 16 QAM ein EVM von höchstens 12,5% gefordert, während bei 256 QAM nur noch 3,5% erlaubt sind.

Hoher Anspruch an die Messung

Da der EVM der wichtigste Parameter für die Güte der Modulation in 5G-NR-Netzen darstellt, ist es entscheidend, den genauen und wiederholbaren EVM eines Geräts oder Systems messen zu können. EVM-Messungen werden fast immer mit einem Spektrum- oder Signalanalysator durchgeführt, der das empfangene 5G-NR-Signal decodieren und den EVM für jedes dekodierte Signal berechnen kann. In manchen Testszenarien wird auch ein Vektorsignalgenerator verwendet, um ein moduliertes 5G-NR-Signal zu erzeugen, das dann in den Prüfling, etwa einen Leistungsverstärker, eingespeist wird.

Beim Messen des EVM mit einem Spektrumanalysator (Bild 4) muss beachtet werden, dass der vom Analysator gemessene EVM sich aus dem EVM des Prüflings und möglicherweise des zugehörigen Kanals sowie dem EMV des Messgeräts zusammensetzt. Letzterer besteht aus dem selbst erzeugten beziehungsweise dem innerhalb des Messgeräts entstandenen EVM. Dieser wird gerne als „Rest-EVM“ bezeichnet.

Traditionell wird für genaue EVM-Messungen gefordert, dass der EVM des Messgeräts mindestens 10 dB unter dem EVM des Prüflings liegen sollte. Selbst

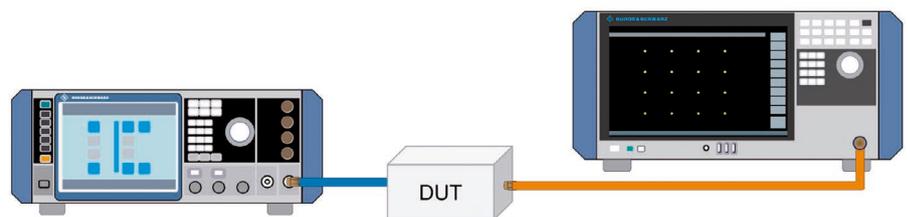


Bild 4: EVM-Messaufbau mit Vektorsignalgenerator und Spektrumanalysator

mit modernen, leistungsfähigen Geräten ist dieser Abstand aber manchmal nur schwer einzuhalten. Dadurch, dass einige 5G-NR-Messungen in einer Over-The-Air-Umgebung (OTA) anstatt leitungsgebunden durchzuführen sind, wird eine gute EVM-Performance des Analysators noch wichtiger – insbesondere wenn die empfangenen Signalpegel aufgrund der Freiraumdämpfung oder anderer Faktoren niedrig sind.

Der Rest-EVM eines Analysators ist auf vier Hauptquellen zurückzuführen: Phasenrauschen, Frequenzgang, Nichtlinearitäten und Breitbandrauschen.

Den ersten drei dieser Quellen ist relativ einfach zu begegnen. In modernen High-Performance-Spektrumanalysatoren kann der Beitrag des Phasenrauschens zum Rest-EVM durch Nutzung hochwertiger Lokaloszillatoren begrenzt werden. Der Einfluss des Frequenzgangs, also der Variation der empfangenen Signaleigenschaften in Abhängigkeit von der Frequenz, lässt sich bei den meisten Applikationen durch Kalibrierung oder Kompensation eliminieren. Nichtlinearitäten wie Harmonische und Intermodulationsprodukte lassen sich mittels Dämpfung einschränken, indem die Amplitude der empfangenen Signale begrenzt wird, um eine Kompression innerhalb des Analysators zu vermeiden.

Das Breitbandrauschen stellt die EVM-Messtechnik jedoch vor komplexere Herausforderungen. Dieses Rauschen wird normalerweise durch herkömmliche Rauschzahlmessungen charakterisiert und umfasst sowohl thermisches Rauschen als auch die Rauschbeiträge einzelner Bauelemente. Außerdem nimmt dieses Rauschen mit der Bandbreite zu. Angesichts der breitbandigen Signale, die im Allgemeinen bei 5G NR zum Einsatz kommen, gewinnt das Thema also besondere Bedeutung. Da diese 5G-NR-Signale mit hoher Bandbreite zudem häufig gemessen werden müssen, wird für genaue EVM-Messungen an 5G-NR-Geräten eine Methode zur Reduzierung oder Minderung der Auswirkungen von Breitbandrauschen auf den Rest-EVM benötigt.

Möglichkeiten zur Messfehlerrückführung

Zur Beseitigung oder Reduzierung des durch den Analysator hinzugefügten Rauschens stehen verschiedene Konzepte oder Verfahren zur Verfügung. Am vielversprechendsten ist jedoch die sogenannte I/Q-Rauschunterdrückung. Dabei handelt es sich um ein mehrstufiges Verfahren, das mehrere Messungen erfordert. Zunächst wird eine Messung durchgeführt, die alle Rauschbeiträge (intern und extern) erfasst. Anschließend erfolgt eine Messung mit terminiertem Ana-

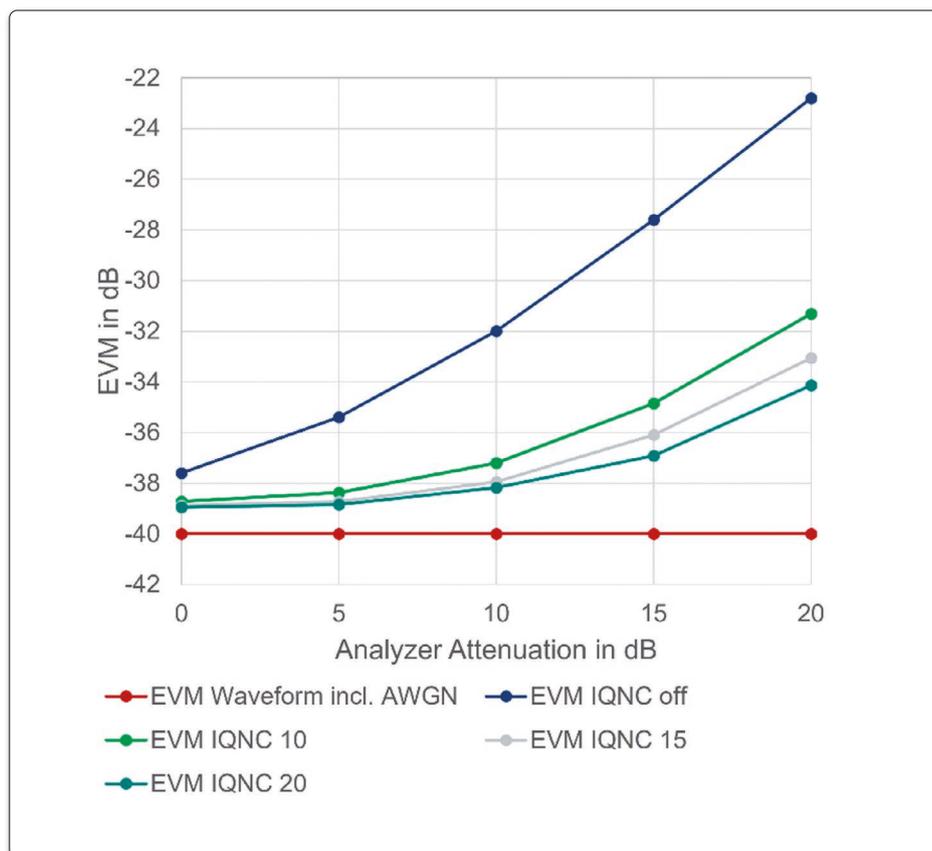


Bild 5: Verbesserung des Rest-EVMs mithilfe von I/Q-Rauschunterdrückung (IQNC) als eine Funktion der Dämpfung und Anzahl der Erfassungen

lysatoreingang, um den Rauschbeitrag des Analysators allein zu ermitteln. Zuletzt werden dann mehrere Erfassungen des Signals durchgeführt, um eine ideale, rauschfreie Erfassung abzuschätzen.

Dieses Verfahren wird als I/Q-Rauschunterdrückung bezeichnet, da die Rauschreduzierung an den rohen I/Q-Daten, also an der digitalen Darstellung der empfangenen Hochfrequenzsignale erfolgt. Diese Methode zur Reduzierung des Beitrags von Breitbandrauschen zum Rest-EVM ist anderen Methoden aus mehreren Gründen überlegen. Für die I/Q-Rauschunterdrückung ist nur ein einziger Messpfad im Messgerät erforderlich, und sie kann vollständig in Software durchgeführt werden, sodass keine Hardware-Änderung im Messgerät erforderlich ist. Die I/Q-Rauschunterdrückung ist außerdem unabhängig von der Modulationsart oder -ordnung. Und schließlich eliminiert sie weder das Rauschen des Signalgenerators noch das Rauschen des Prüflings (Bild 5).

Je nach Eingangsdämpfung kann die I/Q-Rauschunterdrückung die EVM-Messleistung um etwa 5 dB verbessern, was bei EVM-Messungen in 5G-NR-Netzen einen erheblichen Unterschied bedeutet.

Fazit

Der Fehlervektorbetrag ist der wichtigste Parameter für die Modulationsqualität in Mobilfunknetzen, da er den Abstand zwischen idealer Konstellation oder Symbolpunkten und den tatsächlich empfangenen oder gemessenen Symbolpunkten in einem Zahlenwert ausdrückt. Niedrigere EVM-Werte sind immer erstrebenswert, und viele Standards, auch diejenigen für 5G NR, geben maximal zulässige EVM-Pegel für verschiedene Modulationsordnungen an.

Der EVM wird normalerweise mit einem Signal- oder Spektrumanalysator gemessen. Diese Messungen sind zwar prinzipiell nichts Neues und waren bereits für frühere Mobilfunkgenerationen notwendig. Aufgrund der höheren Modulationsordnungen und größeren Bandbreiten kommt EVM-Messungen bei 5G NR jedoch besondere Bedeutung zu.

Genauere EVM-Messungen von 5G-NR-Signalen stellen eine Herausforderung dar. Dank aktueller technischer Entwicklungen wie I/Q-Rauschunterdrückung können vorhandene Geräte genutzt werden, um zuverlässige und wiederholbare EVM-Messungen durchzuführen und so die Konformität mit den relevanten 5G-NR-Modulationsqualitätsvorgaben zu verifizieren. ◀