

Breitband-Technik und 4G LTE

Warum man Kurzwellenfrequenzen nicht vergessen sollte

Der „Dauerbrenner Mobilfunk“ hat vielleicht von folgender Tatsache abgelenkt:
Die globale HF-Kommunikation basiert fast ausschließlich auf der Ausbreitung von Raumwellen und nicht auf direkter Sichtverbindung oder Bodenwellenausbreitung.



Satelliten-Schwachstellen und -Anfälligkeiten

Neben all ihren Vorteilen weisen Satelliten auch eine Reihe von Schwachstellen und Anfälligkeiten auf. Eine feindliche Macht kann eine Vielzahl von Anti-Satelliten-Technologien (ASAT) einsetzen, um ein Raumfahrzeug vorübergehend oder dauerhaft außer Gefecht zu setzen. Bodenbasierte Angriffe, beispielsweise mit Hochleistungslasern, sind relativ kostengünstig und schwer zu stoppen oder zu erkennen. Diese Art von Angriffen kann sogar von Ländern durchgeführt werden, die über keine eigenen Startkapazitäten verfügen. Länder mit Raketenstartkapazitäten können Satelliten mit bodengestützten oder luftgestützten Waffen zerstören. Die Vereinigten Staaten, Russland und China haben zahlreiche ASAT-Tests durchgeführt, und viele andere Länder ASAT-Kapazitäten entwickelt.

Eine weitere Schwachstelle ist die Störungsanfälligkeit, u.a.,

weil Satelliten in der Regel nicht „frequenzagil“ sind und auf Frequenzen arbeiten, die relativ leicht zu stören sind.

Weitere Bedrohungen für die Satellitenkommunikation sind Sonnenstürme. Dieselben Sonneneruptionen und koronalen Massenauswürfe, die Probleme in der Ionosphäre verursachen, können die Satellitenkommunikation stören und wurden sogar für physische Schäden an Satelliten verantwortlich gemacht.

Man sollte auch bedenken, dass Satelliten oder Satellitenkonstellationen nicht immer eine wirklich „globale“ Abdeckung bieten. So ist beispielsweise die Abdeckung der Polarregionen seit langem eine Schwachstelle vieler Satellitensysteme. Nicht alle Satellitenkonstellationen decken die Pole ab, und diejenigen, die dies tun, wie beispielsweise Iridium, benötigen dafür eine relativ große Konstellation. Es kann sogar zu Lücken in der Satellitenabdeckung mitten im Ozean kommen.

Darüber hinaus können bestimmte Gelände- oder geografische Gegebenheiten ebenfalls eine Herausforderung für die Satellitenabdeckung darstellen. Bergige Regionen oder Gebiete mit starkem Bewuchs oder Baumkronen wie Dschungel können die für die meisten Satellitenkommunikationen erforderliche direkte Sichtverbindung blockieren.

Die Latenz ist ein weiterer Kritikpunkt bei der Nutzung von Satelliten. Anwendungen, die geosynchrone Satelliten nutzen, müssen aufgrund der großen Entfernungen mit Verzögerungen von etwa 250 ms rechnen.

Ein letzter Schwachpunkt ist die Sicherheit: Länder möchten für ihre kritische Kommunikation möglicherweise nicht auf die Satelliten eines Verbündeten angewiesen sein.

Dies alles sind nicht unbedingt häufig auftretende Ereignisse oder Probleme, aber da die globale Konnektivität immer „missionskritischer“ geworden ist, gibt es ein zunehmendes Interesse an einer separaten Technologie, die eine ähnliche globale Konnektivität bieten kann, auch wenn diese Konnektivität nicht mit der Geschwindigkeit und Bandbreite von Satelliten mithalten kann. Dies ist eine Aufgabe, für die HF besonders im Sinne terrestrischer Kurzwellenkommunikation gut geeignet ist. HF bietet eine wirklich globale Abdeckung, einschließlich der Polarregionen und Regionen mit schwierigen Geländebedingungen. Abgesehen von Satelliten und HF gibt es nur wenige andere Technologien,

Autor:

Paul Denisowski

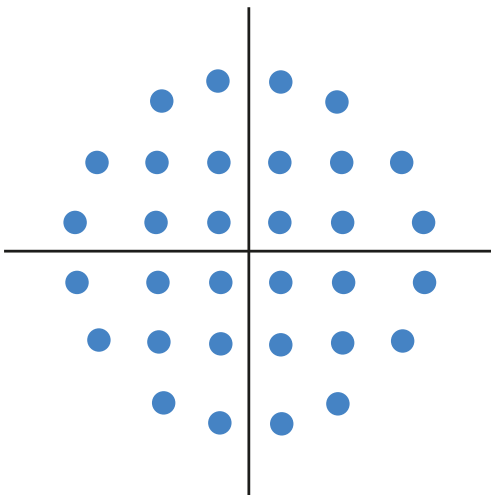
Ingenieur im

Produktmanagement

Rohde & Schwarz

www.rohde-schwarz.de

übersetzt und leicht gekürzt
von FS



Breitband-HF-32-QAM-Konstellationspektrum

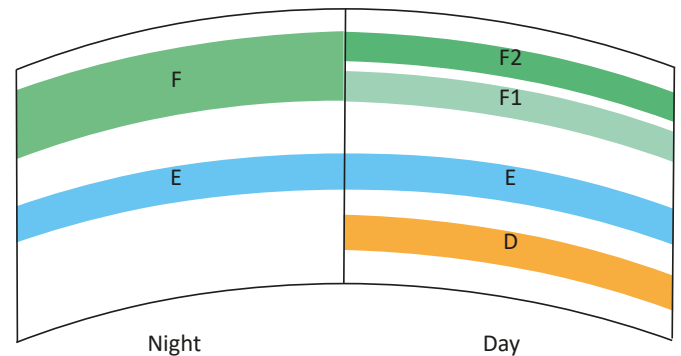
die eine zuverlässige Verbindung zwischen zwei beliebigen Punkten auf der Erde herstellen können. HF benötigt keine spezielle Infrastruktur wie eine Konstellation teurer Satelliten mit begrenzter Lebensdauer – die „Infrastruktur“ für HF ist die Ionosphäre. Das Fehlen einer künstlichen Infrastruktur reduziert die Kosten für die Nutzung von HF erheblich und trägt auch dazu bei, HF widerstandsfähig gegen Angriffe zu machen. Sonnenereignisse können die HF-Ausbreitung vorübergehend stören, aber es gibt keine praktische Möglichkeit für Menschen, die Ionosphäre zu beschädigen, zu zerstören oder ihre Nutzung zu verhindern. Aufgrund der niedrigeren Frequenzen und sozusagen der „Frequenzagilität“ ist HF-Kommunikation im Vergleich zu Satelliten viel schwieriger zu stören.

Damit HF jedoch die Mindestanforderungen an eine moderne globale Kommunikationstechnologie erfüllen kann, sind Verbesserungen oder Erweiterungen gegenüber den traditionellen Verfahren erforderlich. Die erste und wichtigste davon ist eine verbesserte Datenleistung. Obwohl HF niemals den Durchsatz von Satelliten erreichen wird, ist eine bestimmte Mindestdatenrate erforderlich, damit HF in modernen Anwendungen eine praktikable Option ist.

Trotz der Dominanz von Daten ist Sprache nach wie vor ein wichtiger Bestandteil eines globalen Kommunikationssystems, und auch hier gibt es im Vergleich zur bekannten analogen HF-Sprachübertragung erheblichen Verbesserungsbedarf. Was die Ausbreitung betrifft, so kann wenig getan werden, um die Eigenschaften der ionosphärischen oder Skywave-Ausbreitung zu verändern, aber die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit dieses Mediums kann durch moderne Fortschritte in der Modulation und Fehlererkennung/-korrektur verbessert werden. Schließlich kann die Benutzerfreundlichkeit von HF verbessert werden, indem der Prozess der Frequenz- oder Pfadauswahl vereinfacht und der Prozess zum Aufbau, zur Aufrechterhaltung und zur Änderung von Verbindungen automatisiert wird.

Verbesserung der Verfügbarkeit und des Betriebs

Die erste und grundlegendste Aufgabe bei der Verwendung von HF für die globale Kommunikation ist die Entscheidung, welche Frequenz verwendet werden soll, um eine bestimmte Station oder einen bestimmten geografischen Standort zu erreichen. Dies hängt weitgehend vom Zustand der Ionosphäre ab, der wiederum von der Tageszeit, der Phase des Sonnenzyklus

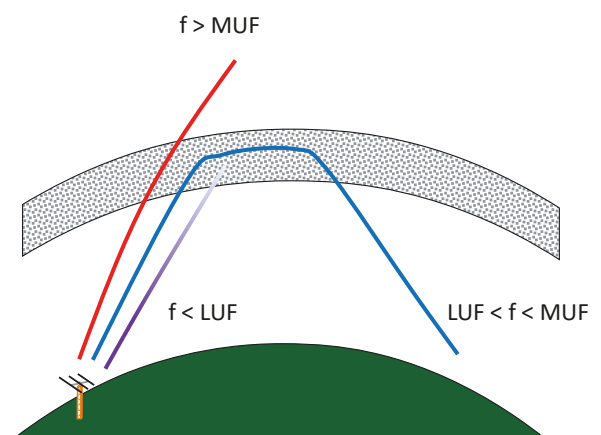


Schichten der Ionosphäre

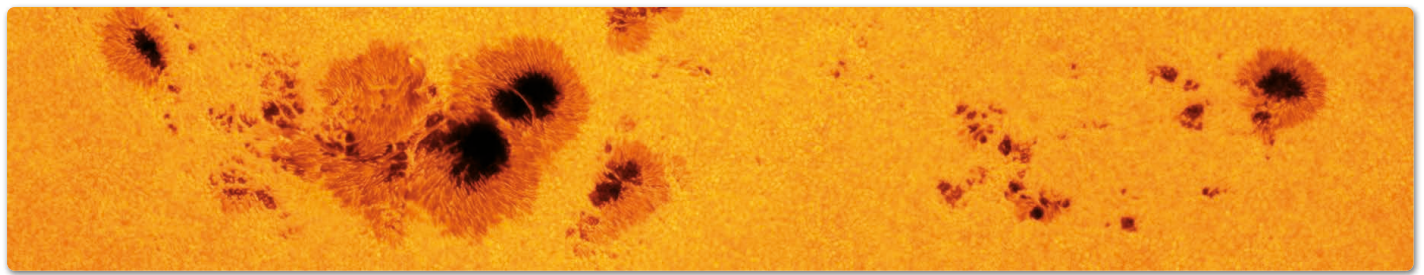
und etwaigen ungewöhnlichen ionosphärischen Bedingungen beeinflusst wird. In der traditionellen HF-Kommunikation konnten erfahrene Bediener in der Regel allein aufgrund ihrer Ausbildung und Erfahrung die maximal nutzbare Frequenz abschätzen, den am besten geeigneten Antennentyp und/oder die Ausrichtung wählen usw. In den letzten Jahrzehnten konnten Ausbreitungsvorhersage-Tools, wie etwa VOACAP, eingesetzt werden, um das Urteilsvermögen erfahrener Bediener zu ergänzen oder weniger erfahrenen Bedienern bei der Bestimmung der besten Frequenz zu helfen. Wenn sich die Bedingungen beispielsweise aufgrund von Änderungen der Ausbreitung oder Störungen/

Jamming änderten, erkannte ein menschlicher Bediener dies und griff ein, in der Regel durch Änderung der Ausgangsleistung oder der Frequenz. Es ist klar, dass dieser Ansatz nicht skalierbar und sehr bedienerabhängig ist.

Der modernere Ansatz versucht daher, alle diese Funktionen automatisch zu übernehmen. Dies wird manchmal als „adaptive HF“ bezeichnet und in ITU-R F 1110-2 1 beschrieben. Beim adaptiven HF wird die optimale Frequenz automatisch ausgewählt, die erste Kommunikation automatisch hergestellt, und das System passt sich bei Bedarf automatisch an veränderte Ausbreitungsbedingungen oder Überlastung/Störungen an.



MUF und LUF (s. Text)



Sonnenflecken

Die bei weitem gängigste Methode zur Umsetzung dieser allgemeinen Grundsätze ist die automatische Verbindungsherstellung (ALE).

Automatische Verbindungsherstellung

Bei ALE wird allen Stationen eine Adresse zugewiesen, die beim Anruf einer bestimmten Station verwendet wird (oder verschiedene Arten von Gruppenadressen). Die Stationen scannen vordefinierte Listen von Kanälen oder Frequenzen, und wenn eine Station sich selbst auf einem dieser Kanäle hört, versucht sie, sich mit der rufenden Station zu synchronisieren. Die Frequenzen, die beim Versuch, eine bestimmte Station anzurufen, verwendet werden, werden anhand einer Verbindungsqualitätsanalyse (LQA) bewertet. Die Stationen senden regelmäßig ihre Adresse zusammen mit einem Signalton. Stationen, die gerade ihre Kanalliste abtasten, messen das empfangene Signal und zeichnen diesen Wert zusammen mit Datum, Uhrzeit und Adresse der sendenden Station auf. Diese Messwerte werden zum Aufbau einer Datenbank verwendet, die bei der Auswahl eines Kanals zum Anrufen einer bestimmten Station verwendet werden kann.

Eine weitere nützliche Funktion von ALE ist die Möglichkeit, einen Kanal abzuhören, um festzustellen, ob er bereits belegt ist (Belegungserkennung), sowie die Fähigkeit, sich an veränderte Bedingungen anzupassen. Die ersten ALE-Systeme stammen aus den späten 1970er und frühen 1980er Jahren. Diese Systeme waren proprietär und daher nicht interoperabel. Mitte der 1980er

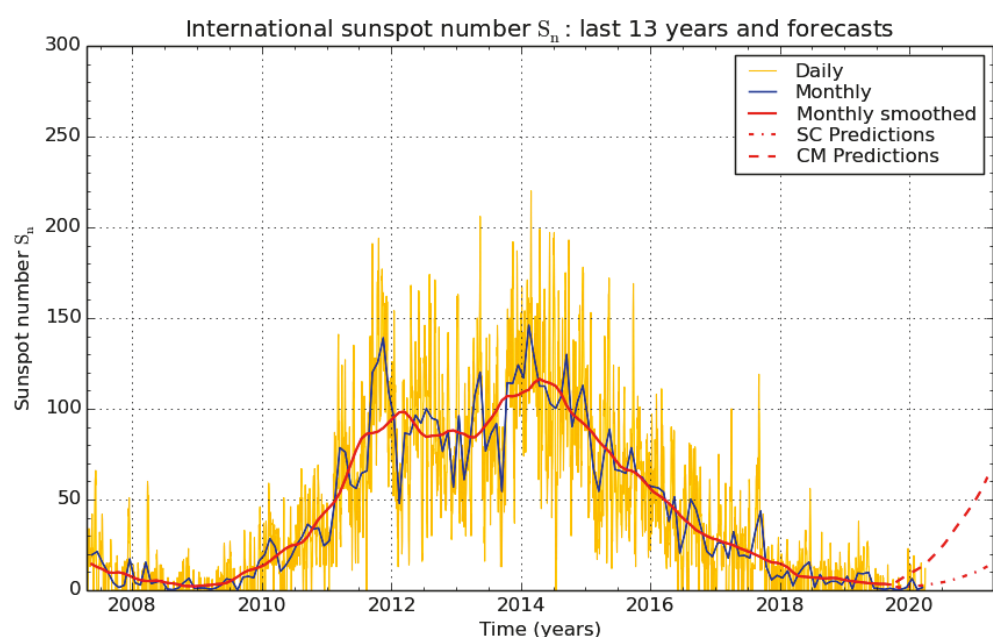
Jahre war der Bedarf an Interoperabilität und erweiterten Funktionen so stark gewachsen, dass 1986 eine neue zweite Generation (2G) von ALE als MIL-STD-188-141A standardisiert wurde. Diese zweite Generation von ALE war interoperabel und trug zur Verbreitung von ALE bei. ALE wurde so beliebt, dass etwas mehr als ein Jahrzehnt später eine dritte Generation (3G) entwickelt und standardisiert wurde. Die dritte Generation von ALE war ein wesentlicher Fortschritt, da sie eine schnellere Verbindungsaufbau und einen zuverlässigeren Verbindungsaufbau unter rauen Bedingungen, d.h. bei niedrigem SNR, unterstützt. 3G ALE unterstützt eine effizientere Zuweisung des Frequenzspektrums, sodass mehr Nutzer die sehr begrenzte Band-

breite im HF-Bereich gemeinsam nutzen können, und ist auch hinsichtlich der Anzahl der unterstützten Stationen skalierbarer.

Welche Modulation?

Traditionell wurde die Bandbreite im HF-Bereich in 3-kHz-„Kanäle“ aufgeteilt. Der Grund dafür liegt in der Unterstützung der gängigen Einseitenband-Sprachübertragung (SSB). In älteren oder veralteten HF-Systemen konnten verschiedene Modems zur Datenübertragung über Sprachkanäle verwendet werden. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Modulationsverfahren, die zur Datenübertragung über HF verwendet wurden, von denen viele heute nicht mehr gebräuchlich sind. So war zunächst die Frequenzumtastung

(FSK) das gängigste Modulationsverfahren, in jüngerer Zeit ist auch die Phasenumtastung (PSK) weitverbreitet. Darauf folgten mit M beginnende Modi wie MFSK, bei denen die Anzahl der Symbole oder Zustände (M) erhöht wurde, um einen höheren Durchsatz zu erzielen. In jüngerer Zeit hat die Zahl der Modulationsverfahren mit noch höherem Durchsatz, wie Varianten der (höheren) QAM stetig zugenommen. Sogar die Sprachübertragung hat einen Wandel durchlaufen, da moderne HF-Systeme Sprache häufig digital über Datenkanäle übertragen. Dies hat das Potenzial, eine viel höhere Qualität als die herkömmliche analoge Sprachübertragung zu bieten, insbesondere unter schwierigen Kanalbedingungen.



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2020 April 2

Sonnenfleckenanzahl ab 2008

Verminderung der HF-Bitfehlerrate

Ohne zu übertreiben kann man sagen, dass HF eines der schlechtesten Transportmedien für die Übertragung digitaler Daten oder „Bits“ ist. HF ist rauschbehaftet und variabel, und sowohl langsame als auch schnelles Fading sind häufig. Oft treten Burst-Fehler auf, bei denen viele Bits hintereinander durch Rausch-Bursts oder plötzliche Fading-Effekte beschädigt werden. Früher war es nicht einfach, Bitfehler zu erkennen oder zu korrigieren, was wiederum die maximalen Übertragungsgeschwindigkeiten begrenzte. Moderne Computerressourcen haben erhebliche Verbesserungen im Umgang mit Bitfehlern ermöglicht. Burst-Fehler können durch Interleaving minimiert werden, also Verteilung dieser Fehler auf eine größere Anzahl von Bits. Interleaving verbessert nämlich die Effizienz einer anderen Technik namens Forward Error Correction (FEC) erheblich. FEC fügt den übertragenen Daten zusätzliche Bits hinzu, mit denen einzelne Bitfehler am Empfänger erkannt und korrigiert werden können. In Fällen, in denen Fehler nicht korrigiert werden können, wird ein höherer Prozess namens Automatic Repeat Request (ARQ) verwendet, um eine erneute Übertragung auf Paketebene anzufordern.

Obwohl diese Techniken etwas banal erscheinen mögen (etwa, weil sie seit vielen Jahren in anderen digitalen Kommunikationssystemen verwendet werden), war ihre Anwendung in der HF-Datenkommunikation entscheidend für die Verbesserung des HF-Datendurchsatzes und der Zuverlässigkeit.

Breitband-HF-Technik

Die Erhöhung der Bandbreite ist der Schlüssel zur Steigerung des Durchsatzes. Einige frühe Versuche zur Verbesserung des standardmäßigen 3-kHz-HF-Kanals umfassten die Verwendung zusätzlicher, unabhängiger Seitenbänder. Die Verwendung mehrerer kleinerer Kanäle erhöht

zwar den Durchsatz, jedoch kann ein einzelner größerer Kanal eine bessere Leistung bieten, weshalb die Breitband-HF-Technik entwickelt wurde. Der derzeit wichtigste Standard dafür ist MIL-STD-188-110D, der 2017 aktualisiert wurde. Dieser Standard definiert zusammenhängende Bandbreiten von bis zu 48 kHz in verschiedenen Schritten, sodass die Wellenform an das verfügbare Spektrum angepasst werden kann. Auf einem 48-kHz-Kanal wurden Datenraten von bis zu 240 Kbit/s erreicht.

Ein weiterer Vorteil dieser breiteren Wellenform ist die erhöhte Robustheit in rauen Umgebungen. Ein breiteres Signal ist schwieriger zu erkennen, da die Energie über eine größere Bandbreite verteilt ist, und breitere Signale sind außerdem widerstandsfähiger gegen Störangriffe.

Breitband-HF umfasst auch Verbesserungen bei den Modulationsarten und Fehlerreduktionsverfahren, wie FEC und Interleaving. Von besonderem Interesse sind die für Breitband-HF festgelegten Modulationsarten. Zusätzlich zur herkömmlichen oder standardmäßigen PSK sind speziell entwickelte QAM-Varianten zu nennen. Diese haben Modulationsordnungen bis zu 256QAM, da eine höhere Modulationsordnung einen höheren Durchsatz ermöglicht. Besonders interessant ist die Tatsache, dass diese Konstellationen eine etwas „kreisförmige“ Form haben, im Gegensatz zu den eher „quadratischen“ QAM-Konstellationen, die in den meisten anderen Anwendungen zu finden sind. Diese kreisförmigen Konstellationen haben den Vorteil, dass sie das Spitzen-zu-Durchschnitt-Verhältnis (PAR) des

A	K	Conditions
0	0	Quiet
2-3	1	Quiet
4	1	Quiet / unsettled
7	2	Unsettled
15-27	3-4	Active
48	5	Minor storm
60	6	Major storm
132	7	Severe storm
208+	8+	Very severe storm

A- und K-Indizes (s. Text)

Signals reduzieren, was wiederum sowohl die Konstruktion als auch die Effizienz von Funkgeräten und Verstärkern vereinfacht.

Die Möglichkeit, Breitband-HF zu nutzen, setzt natürlich die Verfügbarkeit größerer zusammenhängender Regionen mit ungenutzten Frequenzen voraus.

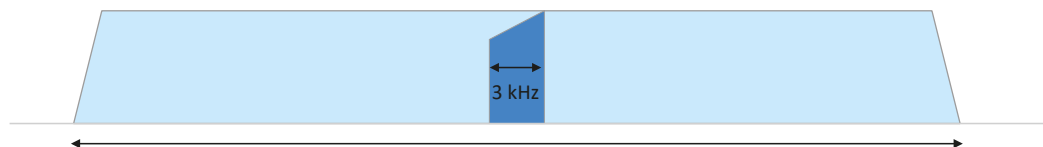
iese verfügbaren Bandbreiten oder „Kanäle“ können durch Vorschriften, andere Nutzer (mit oder ohne Lizenz), Rauschen, Störungen, Interferenzen usw. eingeschränkt sein. Darüber hinaus können Regulierungsbehörden die Nutzung von Breitband-HF durch bestimmte Nutzergruppen oder in bestimmten Frequenzbereichen oder -bändern untersagen. Beispielsweise verbieten die Vorschriften der Federal Communications Commission der Vereinigten Staaten (Titel 47 CFR Teil 97) die Nutzung von Breitband-HF in den Amateurfunkbändern.

ALE der vierten Generation

Die Entwicklung der vierten Generation (4G) oder Breitband-

ALE wurde weitgehend durch die Einführung von Breitband-HF vorangetrieben. Da diese Technik unterschiedliche Bandbreiten, Modulationsarten, Fehlererkennungs-/Korrekturparameter usw. unterstützt, ist 4G-ALE eine wichtige Komponente, um sicherzustellen, dass Stationen ihre Fähigkeiten, beabsichtigte Verkehrstypen usw. austauschen und die effizientesten Parameter für eine bestimmte Verbindung aushandeln können.

Aufbauend auf früheren Versionen von ALE unterstützt 4G ALE auch fortgeschrittenere Formen der Spektrumserkennung, um die optimale Frequenz und Bandbreite für eine bestimmte Verbindung zu ermitteln und Störungen zu vermeiden. Darüber hinaus reduziert 4G ALE den Zeitaufwand für den Aufbau einer Verbindung erheblich und ermöglicht eine einfachere und effizientere gemeinsame Nutzung von Kanälen mit anderen Stationen. All diese Funktionen ermöglichen zuverlässige automatisierte Systeme. ◀



Schmal- und Breitband-HF