

Leistungsverstärker in der erdnahen Umlaufbahn

Entwicklung des Designs von LEO-Satellitenkommunikationssystemen



Technologiegiganten wie SpaceX und Amazon (Kuiper) haben Weltrauminitiativen vorangetrieben, die darauf abzielen, den globalen Breitbandzugang zu verbessern. Die Einführung und Verbreitung von sich schnell bewegenden Satelliten in der niedrigen Erdumlaufbahn (LEO) hat die finanziellen Hürden für den Start erheblich gesenkt und Wege für neuartige Anwendungen eröffnet.

Dieser wirtschaftliche Vorteil ist auf zwei Faktoren zurückzuführen:

1. geringe Größe der Satelliten – die Starlink-LEOs von SpaceX sind so klein wie ein Küchentisch
2. die Möglichkeit, mehrere LEOs gleichzeitig zu starten

Doch während LEOs Satellitenkommunikationssysteme wirtschaftlich rentabler machen, bringen sie auch Komplexität mit sich und erfordern von Ingenieuren, mit höheren Dopplerverschiebungen, Interferenzen und Netzwerkkomplexitäten umzugehen.

Trends, die die Einführung von LEO-Satellitenkommunikationssystemen vorantreiben

Allgegenwärtige Konnektivität – eine Umgebung, in der Geräte von praktisch überall aus Daten erstellen, teilen und verarbeiten können – ist einer der wichtigsten Trends, die die Einführung von LEOs vorantreiben. Trotz der Fortschritte beim Aufbau der terrestrischen Mobilfunkinfrastruktur bleiben große Teile der Welt, wie ländliche Gemeinden und Ozeane, aufgrund von Kosten oder geografischen Gegebenheiten ohne Mobilfunkabdeckung. Satelliten sind eine entscheidende Schlüsseltechnologie, um die Konnektivitätslücken zwischen städtischen und ländlichen Gebieten zu schließen.

Weiter können LEOs die Mobilfunkkapazität verbessern. Immer mehr Menschen nutzen das Internet, was die weltweite Nachfrage nach Mobilfunknetzen erhöht. Ein Großteil dieses Datenverkehrs erfordert hohe Bandbreiten. Mobilfunkunternehmen investieren weiterhin in terrestrische Infrastruktur, da kommerzielle Satelliten nicht immer kosteneffizient waren; die Kosten für LEOs sinken jedoch, was sie zu einer praktikablen Option macht, um der zunehmend begrenzten Bandbreite entgegenzuwirken. Selbst in städtischen Gebieten können LEO-Satelliten genutzt werden, um einen Teil der vom terrestrischen Mobilfunknetz beanspruchten Bandbreite zu entlasten.

Schließlich ist die Kommunikation im Katastrophenschutz ein wichtiger Trend, der die Einführung der Satellitenkommunikation vorantreibt. Die Mobilfunkinfrastruktur ist hier zu unsicher.

Geringere Latenz und wenig Verluste sowie höhere Redundanz

Drei GEO-Satelliten können den Planeten zwar mit wenigen Querverbindungen abdecken, sind jedoch leider weitaus teurer in der Herstellung und beim Start als LEOs. Außerdem ist die Netzwerkkonnektivität erheblich beeinträchtigt, wenn ein GEO-Satellit ausfällt. LEO-Konstellationen mit tausenden von Satelliten verfügen über eine integrierte Redundanz, die einige Ausfälle von Satelliten in der Umlaufbahn auffangen kann.

Während GEO-Satelliten für E-Mails und andere nicht in Echtzeit stattfindende Kommunikation akzeptabel sind, kommt es bei Telefon- und Videoanrufen zu erheblichen Verzögerungen, die eine natürliche Kommunikation behindern. Signalverzögerungen sind bei LEOs viel kürzer. Allerdings benötigen Sender mehr Leistung für die Kommunikation mit LEOs als bei terrestrischen Mobilfunknetzen. Dies liegt daran, dass terrestrische Netzwerksignale eine Strecke von 5 bis 10 km zurücklegen, während LEO-Signale bis zu 2000 km weit reichen und einen höheren Signalverlust erleiden. Jedoch erleidet ein GEO-Signal zur Erdoberfläche mindestens 25 dB mehr Verlust als ein LEO-Signal.

LEO-Herausforderung: Nichtlineare Leistungsverstärkung

Die winzige Größe von LEOs ist sowohl ein Segen als auch eine Herausforderung für die Konstruktion. Die Leistungsverstärker von LEOs müssen physisch klein sein und dennoch über genügend Leistung verfügen, um ein Signal an das vorgesehene Ziel zu senden. Im Idealfall wünschen sich Satellitentechniker, dass PAs auch bei hoher Eingangsleistung eine lineare Charakteristik aufweisen. Die Abbildung zeigt jedoch, dass zu stark angesteuerte PAs Signale erheblich verzerren können. Dies wird durch die Tatsache verschärft, dass 5G-OFDM-Signale (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), die mit LEO-Satelliten verwendet werden, ein Spitzen-zu-Durchschnitts-Leistungsverhältnis (PAPR) von über 10 dB aufweisen können. Dies würde bedeuten, dass die 5G-Signale bei der Einspeisung in die Leistungsverstärker eine relativ geringe Leistung aufweisen müssten, um das spektrale

Quelle:

„The Evolution of Design in Low-Earth Orbit Satellite Communications Systems“

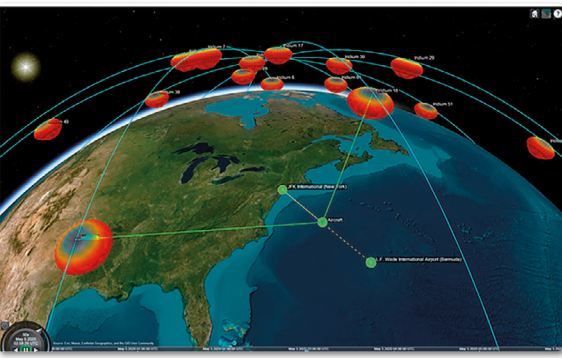
Mike McLernon

Principal Technical Marketing Engineer

MathWorks

<https://de.mathworks.com/>

übersetzt von FS



Die Einführung und Verbreitung von Satelliten in der erdnahen Umlaufbahn (LEO) hat die finanziellen Hürden für den Start von Satelliten gesenkt und den Weg für neue Anwendungsfälle geebnet.

Nachwachsen und die Verschlechterung des Adjacent-Power-Ratios (ACPR) zu vermeiden, die mit einer Übersteuerung des Leistungsverstärkers einhergehen. Solche Eingangsleistungen mit geringer Leistung würden jedoch dazu führen, dass die Leistungsverstärker mit suboptimalem Wirkungsgrad arbeiten.

Es wurden verschiedene Techniken vorgeschlagen, um das PAPR von OFDM zu reduzieren. Dazu gehören:

- Clipping und Filterung
- iteratives Clipping und Filterung,
- Fehlerkontrollcodierung mit Codewörtern, die zur Minimierung des PAPRs ausgewählt werden
- Konstellationserweiterung

Digitale Vorverzerrungs-Subsysteme

Ungeachtet dieser Techniken zur PAPR-Reduzierung können digitale Vorverzerrungs-Subsysteme (DPD) im Sender diesen Verzerrungen entgegenwirken. DPD-Subsysteme zielen nicht darauf ab, den PAPR eines OFDM-Signals zu reduzieren. Vielmehr wenden sie eine „Inverse-PA“-Charakteristik auf das Signal an, wodurch das Ausgangssignal der Leistungsverstärker linearer wird. DPD-Tools, wie beispielsweise die in der Communications Toolbox, nutzen zunehmend KI, um die Ergebnisse zu verbessern. Diese Tools veranschaulichen alle Schritte eines KI-Workflows:

Datenvorverarbeitung

- Offline-Training zum Aufbau eines statischen KI-basierten DPD-Netzwerks
- Online-Training zum Aufbau eines dynamischen Netzwerks, das sich an temperaturabhängige PA-Charakteristiken anpasst
- Netzwerkkomprimierung zur Reduzierung der Rechenkomplexität und des Speicherbedarfs
- HDL-Codegenerierung zur Bereitstellung eines Netzwerks auf einem Edge-Gerät

Ein HDL-Code (Hardware Description Language, Hardware-Beschreibungssprache) ist ein spezieller Computercode zur Programmierung und zum Entwurf von elektronischen Schaltungen, typischerweise für FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) und ASICs. Der Code beschreibt nicht, wie ein Prozessor schrittweise Befehle ausführt, sondern wie die Hardware aufgebaut ist und wie Signale durch physische Logikgatter fließen.

LEO-Herausforderung: Interferenzen

Interferenzen stellen eine weitere Herausforderung dar, wenn LEOs für Satellitenkommunikationssysteme eingesetzt werden. Der Hauptgrund ist die einfache Tatsache, dass sich derzeit etwa 12.000 LEOs in der Umlaufbahn befinden.

Herkömmliche HF-Verbindungen werden seit langem in Satellitenkommunikationssystemen eingesetzt, doch Ingenieure entscheiden sich zunehmend für optische Verbindungen, wann immer dies möglich ist. Optische Strahlmuster sind viel schmäler als bei herkömmlichen HF-Verbindungen, deren breite Strahlen in andere Empfänger übergreifen und Interferenzen verursachen können. Interferenzen durch optische Systeme werden aufgrund der begrenzten Signalausbreitung deutlich reduziert.

Schließlich können Satelliteningenieure auch Phased-Array-Antennen einsetzen. Phased-Array-Antennen können Störungen räumlich auslöschen und Energie auf einen bestimmten Punkt am Boden lenken. Sie maximieren die Strahlenergie in Richtung des gewünschten Signals und erzeugen Strahlauslöschungen in Richtung der Störung, wodurch das Signal-Interferenz-Rausch-Verhältnis (SINR) maximiert wird.

LEO-Herausforderung: Dopplerverschiebungen

Im Gegensatz zu GEOs umkreisen LEOs die Erde nicht mit derselben Geschwindigkeit wie die Rotation des Planeten. Das bedeutet, dass sie sich ständig entweder auf Empfänger zu- oder von ihnen wegbewegen. Diese Bewegung erzeugt einen Dopplereffekt, den Satelliteningenieure beachten müssen.

Technisch gesehen bezieht sich der Dopplereffekt auf die Frequenzdifferenz zwischen der gesendeten und der empfangenen Welle, die durch die Bewegung des Senders oder Empfängers entsteht. Dies erfordert von Satelliteningenieuren, die sich ständig ändernden Mittenfrequenzen von LEOs zu erfassen und zu verfolgen.

Frequenz und Phase von Sender und Empfänger müssen vollständig synchronisiert sein, um sicherzustellen, dass die Wellenformen

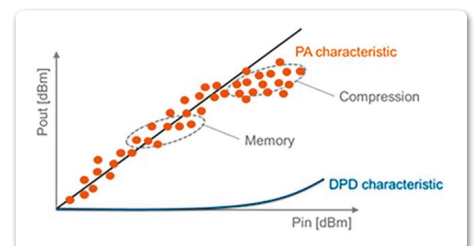
erfolgreich demoduliert werden. Große Dopplerverschiebungen führen jedoch dazu, dass Frequenz, Phase und Timing nicht mehr synchron sind. Daher müssen in diesen Empfängern mehrere Regelkreise implementiert werden, um durch den Dopplereffekt verursachte Frequenzverschiebungen zu beseitigen. Die Synchronisation muss auf der Ebene von Frame, Symbol-Timing, Trägerfrequenz und Trägerphase erfolgen.

Modellierung/Simulation

Die oben beschriebenen Herausforderungen sind ein starker Anreiz, diese Prozesse zu modellieren und zu simulieren, bevor Unternehmen sich zum Bau von Hardware verpflichten. Die Modellierung der Satellitenbahn kann das Ausmaß der durch LEO-Satelliten verursachten Dopplerverschiebung quantifizieren. Die Link-Budget-Analyse liefert eine grobe Schätzung der erforderlichen PA-Ausgangsleistung, der Antennengröße und/oder der Anzahl der für ein Array benötigten Antennenelemente. Die Linksimulation kann eine Leistungsbasis für ein Empfängerdesign liefern, insbesondere unter verschlechterten Kanalbedingungen und bei häufigen HF-Störungen, wie Phasenrauschen, Intermodulationsprodukten und PA-Nichtlinearitäten. MATLAB ermöglicht all diese Modellierungs- und Simulationsarbeiten, sodass LEO-Kommunikationsnutzlasten zuverlässig hergestellt werden können, sofern sie der simulierten Leistung entsprechen.

Fazit

LEOs haben aufgrund ihrer überzeugenden kurz- und langfristigen Anwendungsfälle große Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Unternehmen wie Apple nutzen bereits Satellitenkommunikationsnetze, und das ist erst der Anfang. Da die Satellitenkommunikation die Mobilfunkbranche weiterhin beeinflusst, sollten sich Ingenieure mit deren Einsatzmöglichkeiten, Herausforderungen und den zugrunde liegenden Technologien vertraut machen. ◀



Kennlinie eines Leistungsverstärkers, die die Auswirkungen sowohl der Nichtlinearität (Kompression) als auch des Memory-Effekts zeigt. Die dargestellte digitale Vorverzerrungskennlinie (DPD) kompensiert die Nichtlinearität.