

Satelliten im Wandel

Warum LEO-Systeme die Spielregeln neu schreiben



Im Vergleich zu GEO- und MEO-Systemen erfordert der Betrieb von LEO-Satelliten jedoch eine deutlich komplexere Bodeninfrastruktur. Aufgrund der schnellen Relativbewegung der Satelliten sind hochdynamische Nachführsysteme notwendig, die eine kontinuierliche und präzise Ausrichtung der Antenne auf den LEO-Satelliten gewährleisten. Gleichzeitig steigt die Anforderung an die Multiband-Fähigkeit und flexible Tracking-Verfahren.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Forschungsprojekts SeRANIS (Seamless Radio Access Networks and Internet of Space) an der Universität der Bundeswehr München eine leistungsfähige Bodenstationsinfrastruktur aufgebaut.

Im Zentrum: Multiorbit-fähige Full-Motion-Antenne

Die multiorbit-fähige Full-Motion-Antenne des Herstellers Kratos Antenna Solutions/Kratos Space stellt dabei ein zentrales Element dar. Ihre Integration wurde vom Added-Value Distributor und lokalen Partner in Europa, der Milexia Deutschland GmbH, begleitet.

Nach erfolgreicher Durchführung eines Factory Acceptance Tests (FAT) im Juli 2025 am Standort Plano, Texas, durch Teams von Kratos und Milexia wurde das System Ende des Jahres 2025 an der Universität der Bundeswehr München installiert. Seit März 2026 befindet sich die Antenne im operativen Betrieb.

Der vorliegende Beitrag beschreibt das Systemdesign der Antenne, die wesentlichen technischen Herausforderungen bei der Realisierung sowie erste Erfahrungen aus der Inbetriebnahme und dem Betrieb im SeRANIS-Umfeld. Er knüpft an den Beitrag aus der HF-Welt Ausgabe 12-2023 an und gibt einen Ausblick auf die weitere Zukunft des SeRANIS-Projektes.

*Autor:
Elyes Slama
Vertriebsingenieur
Milexia Deutschland
www.milexia.com/de*

Die Satellitenkommunikation vollzieht derzeit einen grundlegenden Wandel: Während geostationäre Systeme (GEO) von etablierten Anbietern, wie Eutelsat oder Viasat, lange Zeit den Standard für breitflächige Versorgung darstellten, gewinnen Konstellationen im Low Earth Orbit (LEO) – am bekanntesten Starlink, Amazon LEO (Kuiper) und OneWeb – zunehmend an Bedeutung. Ursache hierfür sind insbesondere die deutlich geringeren Latenzzeiten, reduzierte Freiraumdämpfung sowie die Möglichkeit der Übermittlung hoher Datenraten im Gigabitbereich durch moderne, vernetzte Satellitensysteme.



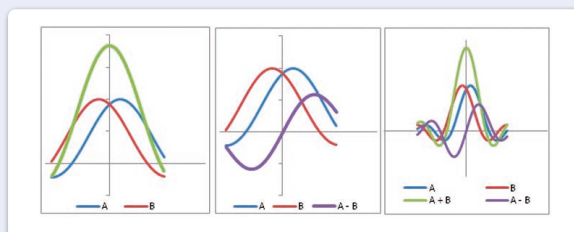
Phased-Array-Antennen von Pals © Pals.com.tr

SeRANIS als Forschungsplattform für LEO-Kommunikation

Das Forschungsprojekt SeRANIS (Seamless Radio Access Networks and Internet of Space) der Universität der Bundeswehr München hat die Entwicklung und Erprobung moderner Technologien für satellitengestützte Kommunikation sowie zukünftiger digitaler Anwendungen im Weltraum zum Ziel.

Das Monopulse-Tracking-Verfahren

Monopulse-Tracking ist eine zuverlässige Nachführungsmethode, die vor allem angewandt wird, wenn es um eine hohe Präzision geht. Es basiert auf dem Prinzip, dass die Signalstärke eines Satelliten von der Richtung abhängt, in der er empfangen wird. Hierzu wird das Beacon-Signal des Satelliten über vier Empfangselemente ausgewertet. Das Summensignal aller Elemente repräsentiert die Gesamtsignalstärke; das Differenzsignal der gegenüberliegenden Elemente repräsentiert den Winkelfehler.



© Earth Station Tutorials

Im Mittelpunkt steht ein Kleinsatellit mit über 15 interdisziplinären Forschungsmodulen. Diese decken unter anderem Bereiche der Satellitenkommunikation, Navigation, Laserkommunikation und Materialforschung ab. Der Satellit fungiert dabei als experimentelle Plattform für die Untersuchung zukünftiger nicht-terrestrischer Netzwerke (NTN) und 6G-Kommunikationskonzepte.

Ein wesentlicher Bestandteil des Gesamtsystems ist die zugehörige Bodeninfrastruktur. Diese umfasst unter anderem eine hochpräzise Full-Motion-Antenne. Sie ermöglicht den Betrieb in unterschiedlichen Umlaufbahnen (LEO, MEO, GEO). Die Antenne arbeitet im X- und Ka-Band und nutzt fortschrittliche Tracking-Verfahren wie Monopulse-Tracking, um auch schnell bewegte Satelliten zuverlässig nachzuführen.

Der für die Mission zentrale Satellit ATHENE-1 wird in einer niedrigen Erdumlaufbahn in Höhe von ca. 550 km betrieben und dient als Demonstrations- und Testplattform.

Innovation am Boden für den Orbit: Full-Motion-Antenne und Systemarchitektur

Im Rahmen von SeRANIS wurde eine multi-orbit-fähige Full-Motion-Bodenstationsantenne des Herstellers Kratos Antenna Solutions realisiert und in die bestehende Infrastruktur der Universität der Bundeswehr München integriert. Die Systemintegration wurde durch Milexia Deutschland als Added-Value Distributor begleitet. Sie umfasst neben der mechanischen Installation insbesondere die Einbindung in die bestehende Hochfrequenz (HF)- und Steuerungsarchitektur der Bodenstation.



SCARAB von Holkirk, Multi-band multi-orbit motorisiertes Manpack Terminal © Holkirk, holkirk.com

Das Antennensystem basiert auf einer 4-m-Reflektorantenne mit kompakter Gregorian-Optik und einer X/Y-Aufhängung. Diese Kinematik ermöglicht eine durchgehende Nachführung ohne Singularitätsprobleme, wie sie bei klassischen Azimut-Elevation-Systemen insbesondere bei schnell überfliegenden LEO- und MEO-Satelliten auftreten können.

Die Antenne ist für den Dualband-Betrieb im X- und Ka-Band ausgelegt umschaltbarer zirkularer Polarisation (LHCP/RHCP) in beiden Bändern. Dadurch wird sowohl der experimentelle Betrieb im Forschungsumfeld als auch der flexible Einsatz in unterschiedlichen Missionsszenarien ermöglicht.

Für die Satellitennachführung stehen mehrere Tracking-Verfahren zur Verfügung, darunter Predictive Tracking auf Basis von TLE-Daten, Step Track sowie modellbasierte Verfahren. Im Ka-Band kommt zusätzlich Monopulse-Tracking zum Einsatz, welches eine hohe Winkelgenauigkeit durch die Auswertung von Differenz- und Summensignalen des Empfangsbeacons ermöglicht.

Die gesamte HF-Kette ist modular aufgebaut und erlaubt die Integration von Hochleistungsverstärkern, Frequenzumsetzern sowie Empfangs- und Sendepfaden innerhalb eines kompakten Außenradoms. Die Steuerung erfolgt über ein zentrales Kontrollsystem, das die Antenne in das Monitoring- und Control-System (M&C) der Bodenstation integriert.

Seit März 2026 befindet sich die Anlage im operativen Betrieb und wird für erste Tests mit LEO-Satelliten und experimentellen Kommunikationsszenarien genutzt.

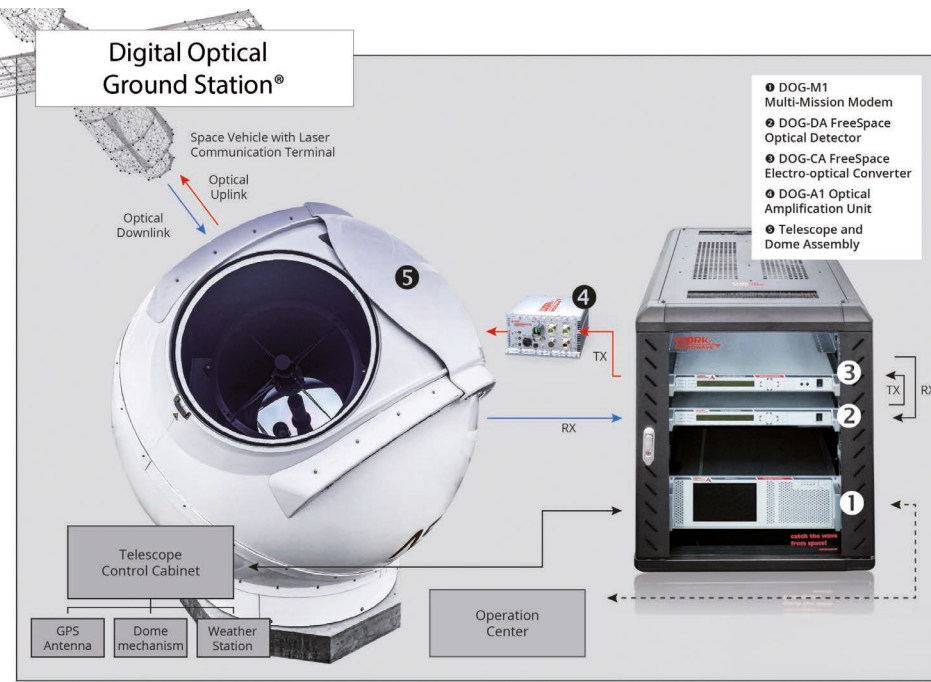


Diagramm einer Digital Optical Ground Station ©DOGS, work-microwave.com

Mehr als nur Antennen: Neue Systemlandschaften moderner Bodenstationen

Die zunehmende Dynamik moderner Satellitenkonstellationen führt zu einer Diversifizierung der erforderlichen Bodeninfrastruktur. Neben hochpräzisen, fest installierten Bodenstationsantennen für Forschungs- und Gateway-Anwendungen entstehen zunehmend flexible Systemkonzepte, die auf unterschiedliche Einsatzszenarien optimiert sind.

Große, sehr leistungsstarke Antennen, wie die oben beschriebene, dienen hauptsächlich der Kontrolle, Steuerung, und der Anbindung der Satellitenkonstellation an das terrestrische Netz. Von ebenso großer Bedeutung sind allerdings auch die Terminal-Antennen, die den Zugriff des Benutzers auf das Satellitennetzwerk erlauben. Hier haben in den letzten Jahren technische Neuerungen und Fortschritte zu einer erheblichen Verbreitung dieser Systeme geführt. Kostenreduktion, moderne Halbleitertechnik, sowie Fortschritte in der Integration haben erheblichen Anteil an dieser Entwicklung.

Transportable und schnell einsetzbare Antennensysteme sind immer gefragter - von SATCOM on the Move bis hin zu optischen Kommunikationsverfahren

Während große Full-Motion-Systeme, wie sie im Rahmen von SeRANIS eingesetzt werden, insbesondere auf maximale Tracking-Performance und Multiband-Fähigkeit ausgelegt sind, gewinnen transportable und schnell einsetzbare Antennensysteme zunehmend an Bedeutung für den mobilen

Endnutzer. Diese sogenannten taktischen oder Manpack-Terminals ermöglichen einen autonomen Betrieb auch in infrastrukturschwachen oder mobilen Einsatzumgebungen.

Typische Systeme dieser Klasse kombinieren geringe Masse und kompakte Bauform mit automatisierter Satellitensuche und Tracking-Funktionalität. Dadurch können sie sowohl in LEO- als auch in höheren Umlaufbahnen eingesetzt werden und ergänzen damit klassische stationäre Bodeninfrastrukturen.

Insgesamt zeigt sich, dass zukünftige Satellitenkommunikationsarchitekturen nicht durch einzelne Antennentypen, sondern durch ein Zusammenspiel unterschiedlicher Systemklassen geprägt sind, die jeweils auf spezifische Anforderungen hinsichtlich Präzision, Mobilität und Skalierbarkeit optimiert sind.

„Satcom on the Move“ (SOTM): Phased-Array- und Flat-Panel-Antennen erobern die mobile Kommunikation, doch es gibt auch Hürden

Im Bereich „Satcom on the Move“ gewinnen zunehmend flache, elektronisch schwenkbare Antennen (Phased-Array- oder Flat-Panel-Antennen) an Bedeutung. Im Gegensatz zu klassischen mechanisch nachgeführten Systemen erfolgt die Strahlrichtung hierbei rein elektronisch durch Phasenverschiebung einzelner Antennenelemente. Dies ermöglicht eine nahezu verzögerungsfreie Nachführung sowie den Verzicht auf bewegliche mechanische Komponenten.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie liegt in der hohen Dynamik und Robustheit gegenüber mechanischen Belastungen, was insbesondere für Anwendungen auf Fahrzeugen, Schiffen oder Zügen von Bedeutung ist. Darüber hinaus ermöglichen moderne Systeme die gleichzeitige Nutzung mehrerer Beams, beispielsweise für parallele Verbindungen zu unterschiedlichen Satelliten oder Netzwerken.

Demgegenüber stehen jedoch auch technische Herausforderungen. Hierzu zählen insbesondere die im Vergleich zu Reflektorantennen häufig geringere Antenneneffizienz, erhöhte Anforderungen an die HF-Leistungserzeugung (EIRP) sowie das thermische Management der dicht integrierten Send- und Empfangsmodule. Zudem führt das elektronische Schwenken zu sogenannten Scan-Loss-Effekten, die insbesondere bei großen Auslenkwinkeln zu einer Reduktion der Antennenverstärkung führen können.

Trotz dieser Herausforderungen stellen Flat-Panel-Antennen eine Schlüsseltechnologie für zukünftige mobile Satellitenkommunikationssysteme dar, insbesondere im Kontext von LEO-Konstellationen mit hoher Satellitendichte und dynamischen Verbindungsanforderungen.

Neben klassischen HF-basierten Bodenstationssystemen gewinnen optische Kommunikationsverfahren zunehmend an Bedeutung. Insbesondere im Kontext von LEO-Konstellationen ermöglichen Laser-Kommunikationssysteme potenziell deutlich höhere Datenraten sowie eine geringere spektrale Belegung.

Optische Bodenstationen stellen jedoch hohe Anforderungen an die Systemtechnik, insbesondere hinsichtlich präziser Nachführung, atmosphärischer Einflüsse sowie Wetterabhängigkeit. Daher werden sie in absehbarer Zeit nicht als Ersatz, sondern als Ergänzung zu etablierten RF-Systemen eingesetzt.

Für Forschungsplattformen wie SeRANIS ergibt sich daraus die Möglichkeit, hybride Kommunikationsarchitekturen zu untersuchen, bei denen RF- und optische Verbindungen je nach Anforderung und Umgebungsbedingungen kombiniert werden.

Eine Gegenüberstellung der konventionellen HF-Datenübertragung in LEO, MEO und GEO mit neuen optischen Datenlinks in der Praxis folgt, sobald ausreichend Daten aus dem Parallelbetrieb in etwa zwei Jahren vorliegen.

Bei Interesse an Vorabinformationen kontaktieren Sie gern den Autor bei Milexia Deutschland: elyes.slama@milexia.com ◀