

فهم المدارات

تقع الأقمار الصناعية بحكم التعريف فوق الغلاف الجوي للأرض وخارجه، وتتحرك على طول مسارات منحنية تحيط بالكرة الأرضية تسمى المدارات. سيتفاعل جسمان في فراغ الفضاء مع بعضيهما، بالنسبة إلى كتلتيهما وسرعتيهما والمسافات بينهما. للحفاظ على مدار ثابت حول الأرض، ستحتاج الأقمار الصناعية إلى التحرك على طول مساراتها المدارية بسرعات مختلفة اعتمادًا على المسافة المدارية من الأرض، حيث إن التحرك ببطء شديد قد يؤدي إلى تحطم القمر الصناعي مرة أخرى في الغلاف الجوي للأرض، بينما التحرك بسرعة كبيرة من شأنه أن يؤدي إلى خروج القمر عن مداره والتخليق بحرية في الفضاء. بالإضافة إلى السرعات المتغيرة بناءً على بعدهم عن الأرض، فكلما كان القمر الصناعي بعيدًا عن الأرض كان مساره الدائري أطول.

تؤدي الاختلافات في السرعات والطول الذي يجب أن يسافر به القمر الصناعي في مداره، جنبًا إلى جنب مع حقيقة أن الأرض تدور حول محورها، إلى تجارب مختلفة للغاية عند مشاهدة الأقمار الصناعية من موقع نسبي على سطح الأرض. إذا كان هناك قمر صناعي واحد يدور بالقرب من الأرض، فقد يكون "مرئيًا" فقط لفترة قصيرة من الوقت من أي نقطة معينة على سطح الأرض. إذا كان قمر صناعي واحد يدور بالقرب من الأرض على طول مسار محدد مسبقًا دون تغيير، على طول خط الاستواء على سبيل المثال، فقد لا يكون "مرئيًا" أبدًا من زوايا معينة، مثل المناطق القريبة من قطبي الأرض.

وعلى عكس ذلك، فكلما كان القمر الصناعي يدور بعيدًا عن الأرض، زادت زاوية عرضه، مما يعني أنه قد يكون من الممكن الوصول إليه باستمرار من أي نقطة معينة على الأرض. ومع ذلك، فإن السرعة التي قد يدور بها القمر الصناعي حول الأرض على مسافة أبعد قد تشير إلى أن القمر الصناعي قد يتعذر الوصول إليه لفترات زمنية أطول، أو لا يمكن الوصول إليه على الإطلاق حسب موقع المشاهد.

يُعد فهم كيفية عمل الأقمار الصناعية أمرًا ضروريًا للمنظمات الإنسانية التي تخطط لاستخدام الاتصالات الساتلية كجزء لا يتجزأ من عملياتها.

المدار المتزامن مع الأرض/الثابت بالنسبة إلى الأرض

عندما يتطابق الوقت الذي يستغرقه القمر الصناعي لإكمال مدار واحد كامل مع الوقت الذي تستغرقه الأرض لإكمال دورة كاملة على محورها، وعندما يدور القمر الصناعي مباشرة فوق خط الاستواء وفي نفس اتجاه دوران الأرض، فإنه يطلق عليه المدار "المتزامن مع الأرض". النتيجة العملية للمدار المتزامن مع الأرض هي أنه عند النظر إليه من سطح الأرض، يبدو أن القمر الصناعي يبقى في الموقع الدقيق فوق سطح الأرض في جميع الأوقات، ويمكن أن يطلق عليه قمر صناعي "ثابت بالنسبة إلى الأرض".

سيكون القمر الصناعي المتزامن مع الأرض دائمًا على ارتفاع ثابت يبلغ 35,786 كم، وسيكون قادرًا على الوصول إلى ما يقرب من 40% من سطح الأرض في المنطقة الواقعة أسفل القمر الصناعي مباشرة. عند أقرب مسافة، سيكون هناك دائمًا تأخير لا يقل عن 240 مللي ثانية، أو 0.25 ثانية بين وقت إرسال البيانات/الرسالة، ووقت استلامها على الجانب

الآخر. ومع ذلك، اعتمادًا على ترتيب الشبكة، وسرعة الأجهزة المادية، وحيث يكون جهاز الإرسال/جهاز الاستقبال ضمن منطقة تغطية 40%، يمكن أن يزيد زمن الانتقال.

تُعد الأقمار الصناعية في المدار المتزامن مع الأرض مفيدة عندما يكون هناك قمر صناعي واحد أو عدد قليل من الأقمار الصناعية المطلوبة أو المستخدمة لتقديم خدمة مستمرة إلى منطقة واسعة. نظرًا إلى حقيقة أن الأقمار الصناعية لا تتحرك بالنسبة إلى المشاهد، فإن أجهزة الاتصالات التي تصل إلى قمر صناعي ثابت بالنسبة إلى الأرض ستحتاج إلى تثبيتها وتوجيهها بشكل دائم، ولا يمكن نقلها أو إعادة توجيهها بسهولة. هذا يعني أنه على الرغم من أن أجهزة استقبال الأقمار الصناعية ليست محمولة، فإنها لا تحتاج أيضًا إلى أن تكون مضغوطة، ويمكن أن تتسع لتكون كبيرة بالقدر المطلوب للوظيفة.

لسوء الحظ، فإن الأقمار الصناعية المفردة التي تغطي مساحة كبيرة تعني أن الأقمار الصناعية الوحيدة المستقرة بالنسبة إلى الأرض يمكنها، وهي بالفعل تقوم بذلك/أن تؤدي خدمة لعدد كبير من المحطات القاعدية الثابتة، ويعتمد جميع المستخدمين داخل المنطقة الجغرافية للتغطية على مصدر واحد لنقل وإدارة اتصالاتهم. يؤدي هذا غالبًا إلى توفر نطاق ترددي محدود، ويمكن أن يتسبب في مشكلات أمنية، أي أن القمر الصناعي الواحد يمثل نقطة فشل واحدة. بالإضافة إلى ذلك، من السهل على الحكومات أو الجيوش استخدام الأقمار الصناعية المستقرة بالنسبة إلى الأرض باستخدام التكنولوجيا المناسبة للحظر أو التشويش، حيث سيظل الطول الموجي الإجمالي ثابتًا ويمكن موازنته.

المدار الأرضي المنخفض

القمر الصناعي للمدار الأرضي المنخفض (LEO) هو مصطلح شامل يستخدم لوصف أي قمر صناعي يعمل تحت ارتفاع 2,000 كم، بينما مصطلح المدار الأرضي المنخفض للغاية (VLEO) يشير إلى قمر صناعي يدور حول ارتفاع 450 كم. لا يوجد مسار أو مسافة محددة لأقمار الاتصالات التي قد تسكن نطاق المدار الأرضي المنخفض، وهناك مجموعة متنوعة من المزودين المختلفين وتكوينات الأقمار الصناعية الذين يستخدمون هذا النظام.

تدور الأقمار الصناعية في المدار الأرضي المنخفض بسرعة نسبيًا مقارنة بالدوران الأرضي، وستصنع ما لا يقل عن 11.25 مدارًا للأرض في يوم واحد، مع إمكانية أكبر للأقمار الصناعية ذات المدار الأرضي المنخفض ذات المسافات المدارية الأقصر. نظرًا إلى حقيقة أن أقمار المدار الأرضي المنخفض أقرب كثيرًا إلى الأرض، فإن مجال "رؤيتها" أقل بكثير، ويمكن لكل قمر صناعي في مدار منخفض أن يغطي نسبة مئوية صغيرة فقط من سطح الأرض في وقت واحد. كما أن الأقمار الصناعية للمدار الأرضي المنخفض غير مقيدة باتجاه مدارها؛ قد تدور المدارات الأرضية المنخفضة من الشمال إلى الجنوب على طول القطبين، على طول خط الاستواء، أو في أنماط قطرية تغير باستمرار مناطق تغطيتها النسبية.

إذا كان جهاز الاتصالات الموجود على سطح الأرض سيتواصل مع قمر صناعي للمدار الأرضي المنخفض (LEO) واحد فقط، فسيكون القمر الصناعي خارج التغطية لفترات كبيرة على مدار اليوم. لمعالجة هذه المشكلة، سيقوم مقدمو الاتصالات عبر الأقمار الصناعية بإنشاء أقمار صناعية متعددة وجعلهم يتواصلون مع بعضهم في كوكبة أو مصفوفة من الأقمار الصناعية. ستتواصل الأقمار الصناعية للمدار الأرضي المنخفض الموجودة في إحدى المصفوفات إما بشكل مباشر أو من خلال العديد من شهادات عدم ممانعة على الأرض. يوجد عدد من أقمار المدار الأرضي المنخفض ومنطقة

التغطية التقريبية في مصفوفة متغيرة للغاية، ويمكن أن تتراوح من عدد صغير لتطبيقات محددة إلى مصفوفات محتملة لمئات الأقمار الصناعية التي تخدم غرضًا واحدًا.

تقدم أقمار المدار الأرضي المنخفض مزايا فيما يتعلق بأن العدد المتزايد لأقمار الاتصالات الوظيفية يمكن أن يعزز توفر عرض النطاق الترددي القابل للاستخدام بنسبة كبيرة. توفر مصفوفات القمر الصناعي للمدار الأرضي المنخفض أيضًا بعض الفوائد الأمنية، أي إذا واجه قمر صناعي واحد مشكلات فنية، فمن المحتمل ألا يؤثر على الأقمار الصناعية الأخرى في الكوكبة. كما أن أقمار المدار الأرضي المنخفض هي أيضًا أصعب بكثير من ازدحام الرادار، حيث تصعب حركتها داخل الإشارات فنيًا.

لسوء الحظ، تؤدي الأقمار الصناعية في المدار الأرضي المنخفض أيضًا إلى ارتفاع كبير في تكاليف بدء التشغيل والاستخدام لأن إرسال أقمار صناعية متعددة إلى المدار وصيانتها يضيف تكلفة أكبر للعملية. أيضًا، نظرًا إلى أن الأقمار الصناعية في المدار الأرضي المنخفض لها مجالات رؤية أضيق، فقد يصعب الحفاظ على إشارة متسقة في بعض بيئات التشغيل.

كانت هناك زيادة مؤخرًا في عدد مزودي أقمار المدار الأرضي المنخفض (LEO) ومصطلح المدار الأرضي المنخفض للغاية (VLEO)، حيث أصبحت الشحنات الفضائية التجارية أكثر عملية من الناحية المالية، وأصبحت الأجهزة اللازمة لصنع أقمار الاتصالات أصغر وأرخص.