Abstract

Resumindo, o paper é um estudo sobre os planos da SpaceX para construir uma constelação de 4.425 satélites de comunicação em órbita terrestre baixa, que utilizará antenas de matriz em fase e comunicação laser entre satélites para fornecer uma cobertura global de baixa latência e elevada largura de banda. O estudo utilizou dados públicos dos registros da FCC para construir um simulador e avaliou as propriedades de latência da rede, bem como o problema do encaminhamento na rede. O estudo conclui que essa rede pode fornecer comunicações de latência mais baixa do que qualquer rede terrestre de fibra óptica para distâncias superiores a cerca de 3000 km.

Introdução

O artigo salienta a questão da latência nos sistemas em rede e o modo como se tornou um factor limitativo, mesmo depois de se ter resolvido o problema do congestionamento e do aumento da capacidade das memórias intermédias. Apresenta a constelação Starlink, que visa fornecer conectividade global à Internet de baixa latência e alta taxa de bits. O estudo visa avaliar as propriedades de latência de uma rede deste tipo e o problema do encaminhamento na mesma, utilizando um simulador baseado em pormenores públicos dos registos da FCC. A topologia dinâmica da constelação e a sua nova arquitectura de rede são também discutidas, e o estudo visa fornecer uma visão antecipada destas interacções e das propriedades emergentes de latência de extremo a extremo.

Starlink

A Starlink é uma constelação de Internet por satélite desenvolvida pela SpaceX para fornecer Internet de alta velocidade e baixa latência a zonas remotas e mal servidas em todo o mundo. A constelação será eventualmente constituída por dezenas de milhares de pequenos satélites em órbita terrestre baixa (LEO), sendo a primeira fase constituída por 1600 satélites em órbitas a 1150 km de altitude. A segunda fase acrescenta mais 2825 satélites em órbitas que vão de 1100 km de altitude a 1325 km, aumentando a densidade da cobertura em latitudes mais baixas e proporcionando uma cobertura pelo menos até 70 graus norte. Uma terceira fase propõe o lançamento de mais 7.518 satélites em órbitas VLEO de aproximadamente 340 km

.

Os satélites da constelação comunicam-se entre si através de comunicações ópticas no espaço livre, dispondo cada satélite de cinco ligações laser no espaço livre para ligação a outros satélites Starlink. As comunicações ópticas no espaço livre foram testadas em órbita, mas não existe nenhum sistema de alta taxa de bits que funcione nas distâncias moderadas que a Starlink irá utilizar. No entanto, parece provável que sejam possíveis velocidades de ligação laser no espaço livre de 100 Gb/s ou superiores.

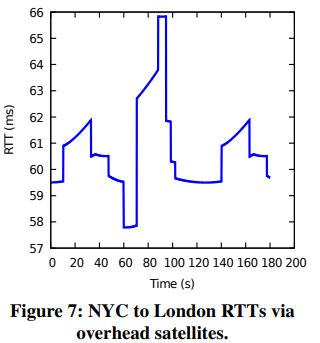
Para proporcionar uma densidade de cobertura contínua, os 50 satélites em cada plano orbital têm de estar uniformemente espaçados em torno da órbita, com os 32 planos orbitais orientados de modo a cruzar o equador em longitudes uniformemente espaçadas. O desvio de fase entre os planos orbitais é um múltiplo de 1/32, tendo os 1600 satélites iniciais um desvio de fase de 5/32 para minimizar a probabilidade de colisão se a manutenção de estações não for perfeita. A cobertura fornecida pela constelação não é uniforme.

Building a Network

Em resumo, a construção de uma rede para uma constelação LEO densa como a Starlink envolve a interligação de satélites com lasers de forma a proporcionar uma comunicação de baixa latência numa área alargada, particularmente entre os principais centros populacionais. Para manter boas trajectórias, a maioria das ligações laser deve estar sempre activa, o que limita as soluções. As ligações laser para os dois vizinhos mais próximos de qualquer satélite, o mais à frente no mesmo plano orbital e o mais atrás no mesmo plano orbital, só precisam de afinar a sua orientação, pelo que estes são os candidatos óbvios para as duas primeiras ligações a laser. Para formar uma rede, a prioridade seguinte é estabelecer ligações entre diferentes planos orbitais, particularmente entre os planos orbitais vizinhos que permanecem consistentemente ao alcance. O encaminhamento para a frente e para trás ao longo dos planos orbitais já proporciona uma boa conectividade, pelo que o próximo par de lasers deve ligar entre os planos orbitais numa direcção tão ortogonal quanto possível: ou norte-sul ou este-oeste. A rede resultante fornece uma boa malha, mas existem duas malhas distintas que se deslocam geralmente para nordeste e sudeste numa mesma região, sem qualquer conectividade local entre as duas sem percorrer o longo caminho à volta do planeta. A utilização do laser final para fornecer ligações inter-mesh melhora significativamente as opções de encaminhamento.

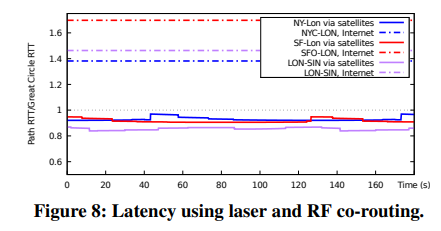
A rede descrita no paper fornece rotas de baixa latência utilizando o algoritmo de Dijkstra na rede de satélites, em que as latências das ligações são utilizadas como métricas para fornecer os caminhos de latência mais baixa. Cada estação terrestre liga-se ao satélite que está mais diretamente acima para fornecer a melhor intensidade de sinal RF para ligações ascendentes e descendentes. No entanto, a rede não é estática, pelo que é necessário executar o algoritmo de Dijkstra a cada 10ms. Executando o Dijkstra nesta topologia para todo o tráfego originado por uma estação terrestre para todos os destinos, podemos encaminhar o tráfego que encontrará sempre ligações no momento em que o pacote chega ao satélite relevante.

Routing



A latência entre cidades evolui ao longo do tempo à medida que a rede muda, e o RTT é mostrado na Figura 7. O RTT do satélite é, em média, bastante baixo, embora o grande pico de atraso entre 70 e 95 segundos seja certamente indesejável. Os picos são causados quando os satélites diretamente acima das duas cidades estão em diferentes partes da constelação. As ligações RF e laser estão incluídas no mapa de rede sobre o qual corremos o Dijkstra para obter o menor atraso, resultando na utilização de satélites que estão

bastante próximos de 40° da vertical.



A latência entre as diferentes cidades é mostrada na Figura 8, onde o RTT do satélite é significativamente menor do que o limite inferior para a comunicação por fibra óptica nos três casos.

A fase 2 da rede inclui mais 1.600 satélites em órbitas com 53,8° de inclinação, que são estritamente paralelas às órbitas de 53° dos satélites da fase 1, mas estão 40 km mais baixas, pelo que completam uma órbita em menos 53 segundos do que na fase 1. Utilizando o primeiro par de lasers para ligar ao longo do plano orbital, temos agora a possibilidade de escolher como utilizar os restantes lasers. A ligação de satélites adjacentes de 53° e 53,8° é problemática devido à diferença de velocidade; os caminhos directos Este-Oeste tornam-se lentamente em zigue-zague antes de os satélites acabarem por mudar.

Research data

No final do paper discute-se as questões de investigação levantadas pela rede Starlink. A rede levanta questões relacionadas com a reordenação, a resistência a falhas e o encaminhamento dependente da carga.

Em primeiro lugar, aborda-se a reordenação. A rede de satélites tem tipos de reordenação diferentes dos encontrados nas redes terrestres. O controle de congestionamento baseado no atraso, como o BBR, pode não ter um bom desempenho numa rede deste tipo. Para evitar a reordenação, a estação terrestre receptora mantém um buffer de reordenação. Se a estação terrestre remetente anotar os pacotes com um número de sequência, um ID de caminho e o tempo decorrido desde que enviou o último pacote no caminho anterior, a estação terrestre receptora pode identificar o primeiro pacote a chegar no novo caminho. Em seguida, a estação terrestre receptora coloca em fila de espera todos os pacotes que chegam no novo caminho até que todos os pacotes anteriores tenham chegado ou até que tenha decorrido um tempo específico. Finalmente, a estação terrestre emissora retira os pacotes fora de ordem de qualquer fila, se houver uma fila mais longa do que a diferença entre os atrasos do caminho.

Em segundo lugar, discute-se a resistência da rede de satélites a falhas. Se um transceptor de RF falhar, esse satélite ainda pode retransmitir o tráfego; existem muitos outros satélites ao alcance de uma estação terrestre. No entanto, todas as estações terrestres precisam de ser informadas de qualquer falha, para que a possam ter em conta nas suas considerações de encaminhamento. Se os cinco transceptores de um satélite forem intermutáveis, a constelação continua a funcionar quase sem alterações, desde que os quatro transceptores restantes sejam utilizados para as ligações ao longo do plano orbital e para as ligações laterais. A rede tem uma redundância muito boa.

Finalmente, fala-se sobre o encaminhamento dependente da carga. Nas redes terrestres, os esquemas de encaminhamento centralizados dependentes da carga podem encaminhar proactivamente de modo a obter uma baixa latência sem causar congestionamento. Estes esquemas tomam decisões de encaminhamento numa base de minuto a minuto e podem ser demasiado lentos para o encaminhamento em constelações LEO densas. No paper postula-se que uma solução híbrida pode funcionar bem. O tráfego de alta prioridade e baixa latência tem sempre prioridade, o controlo de admissão limita o seu volume, impedindo-o de causar congestionamento