

항공기 통신 품질 분석 보고서

LTE 및 Starlink 이중 네트워크 비행 중 품질 분석

- 위치 정보: 398.59° (± 6° 40°)
- 고도 정보: 2,620°
- 지상 속도: 5.758 km
- 방향 속도: 51.9 km/h

- LTE 연결: 8,828° (100%)
- Starlink 연결: 6,321° (53.9%)
- 주파수 정보: LTE 2 Hz, Starlink 1.6 Hz
- UTC 정보: 0.5° (0.5°)

- LTE 신호: RSSI, RSRP, RSRQ, SINR, eNodeB, Band
- Starlink 신호: Latency, Throughput, Azimuth, Elevation, GPS Sats
- 데이터 속도: 10° (10°)

분석 일자: 2026년 1월 29일

전문 데이터 분석 시스템 v1.0

주요 발견 사항 (Executive Summary)

LTE 100% 100%

- LTE 100%:
- ✓ RSSI: 99.4% Good (RSSI > -76.5 dBm)
 - ✓ RSRP: 100% (RSRP > -140 dBm, 0.1%)
 - ✓ SINR: 100% (SINR > 13 dB)
 - ✓ RSRP ↔ RSSI: 0.919

- RSRP 100%:
- Excellent (>-70 dBm): 0.6% (16 cells)
 - Good (-70~-85 dBm): 99.4% (2,604 cells)
 - Fair (-85~-100 dBm): 0%
 - Poor (<-100 dBm): 0%

- SINR (100%):
- Average: 17.4 dB (Good)
 - Excellent (>20 dB): 4.7%
 - Good (13~20 dB): 94.8%
 - Fair (0~13 dB): 0.4%

Starlink 100% 100%

- Starlink 100%:
- ✓ Latency: 96.7% Good (Latency < 68.4 ms)
 - ✓ Throughput: 53.9% (Throughput > 100 Mbps)
 - △ Throughput CV: 308%
 - △ Latency CV: 10%

- Latency 100%:
- Excellent (<40 ms): 3.3% (46 cells)
 - Good (40~100 ms): 96.7% (1,367 cells)
 - Fair (100~200 ms): 0%
 - Poor (>200 ms): 0%

- Throughput 100%:
- Average: 0° ~ 89.7° (Throughput > 100 Mbps)
 - Latency: 10% (>30° Latency > 100 ms)
 - Throughput: 100%↑ = 100%↑ (0.285)
 - GPS: 16~21° (GPS > 100° Latency > 100 ms)

Starlink 100% 100%

- Starlink 100%:
1. Latency: LTE (100% Good, 100%)
 2. Throughput: Starlink (100% Good, 100%)
 3. RSSI: LTE RSSI < -85 dBm & Starlink RSSI > -85 dBm
 4. Latency: Starlink Latency > 100 ms & LTE Latency > 100 ms

- Throughput 100%:
- LTE & Starlink Throughput: -0.499
 - Latency: 100% (Latency > 100 ms)
 - Throughput: 100% (Throughput > 100 Mbps)

- Latency 100%:
- ✓ Latency: LTE (100% Good)
 - ✓ Throughput: Starlink (100% peak throughput)
 - ✓ Latency: LTE + Starlink Latency > 100 ms
 - ✓ Throughput: 100% (Throughput > 100 Mbps)

비행 시나리오 및 데이터 수집 과정

00 00 0 00

00 00:

- 0000 00 0 LTE 0 Starlink 00 0000 00 00 00
- 00 00 0000 0 00000 00 00 00
- 0000 00 0000 00 0 00 00 00 00

00 0000:

- 00 00: 2026 1 23 06:02 ~ 06:12 (UTC)
- 00 00: RTL (Return To Launch) 00 00
- 00 00: 5.758 km
- 00 00: 0 50~150m (00 00)
- 00 00: 51.9 km/h
- 00: 0000 0000 00 (00 36.88°N, 00 126.38°E)

00 0000 0000 (0000)

✓ LTE 00: LG U+ 0000 (Band 5/7)

Phase 1: 00 00 LTE 00 (06:02:01 ~ 06:05:25, 204)

- LTE 00 00: RSSI -75 dBm, 0000 00 0000 00
- 0000: eNodeB 12519~12525 (6 0000) 0000 00
- Starlink: 00 000 (0000 00 0)
- GPS 00: 16 00 00

Phase 2: Starlink 00 0 00 0000 00 (06:05:25 ~ 06:12:01, 396)

- Starlink 00 00: 0000 68.4 ms
- 0 0000 00 00 (0000 00)
- LTE: 100% 0000 00, RSSI -76.5 dBm 00
- Starlink: 53.9% 0000, 10 00 00 00
- 00 000:

- 00 00 #1~5: 0000 00 (>30°)

00 00 * 0000E (Critical Events) ↔ Band 5

→ eNodeB 0000: 6 000 0 00

LTE 0000 0000:

Phase Event 1: RSSI 00 3 00 00 (>5 dBm ~ 00): 15:25, 204

- LTE 00: eNodeB: 0000 00 00 00
- Starlink: 00 (1 0000 00, 0000 00 00)
- Starlink 00 00 (06:15:25)
- ✓ Event 2: SINR 22 dB peak 0000 Starlink 6,321
- 00: 00 00 00 00, 00 00 00
- 00: 00 00 00 (00 0000 00)

Starlink 0000 0000:

△ Event 3: 00 00 10 00
→ 0000 00: 00 302° (00 00 00)

→ 0000 00: 00 0 5~10 ms 00
0000 00 00 00: 000 (00 00 00)

00 0000: Event 4: Throughput 00 00

- ✓ LTE 00 Starlink 00 UTC 0000 0000 00 (Z suffix) 00 308%)
- ✓ ULG 00 0000 0.5 0000 00 53.2 Mbps (00 00 296%)
- ✓ 0000 00: 396 00 (0000 66%), burst traffic
- ✓ 0000 00: ±0.25 00

00 Event 5: 0000 0000 00

0000 00: 0000↑ (0000 0000) = 0000↑ (0.285 00)

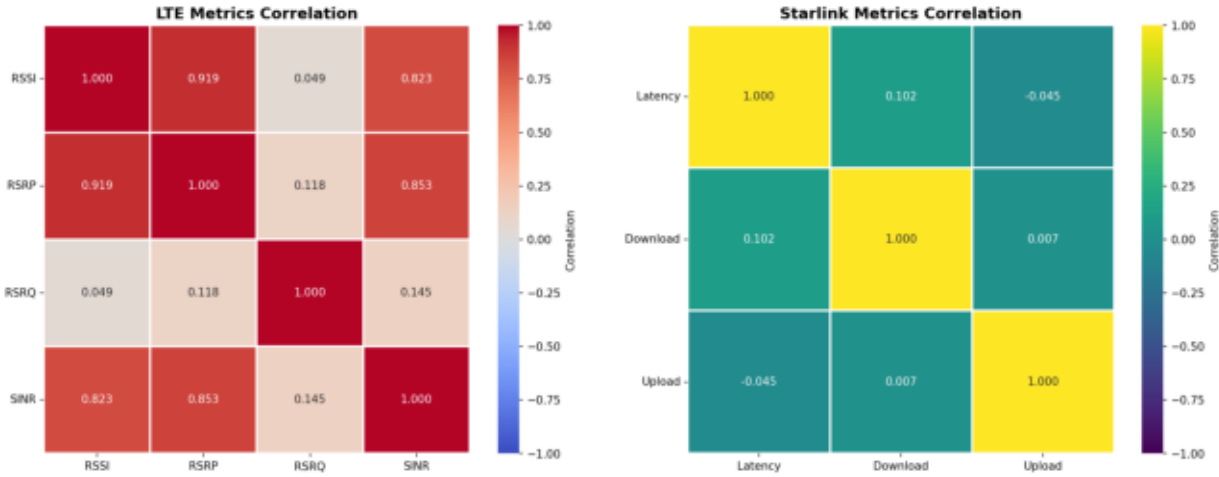
- ✓ LTE -999 00 0 0000 00 = 0000↓
- ✓ Starlink GPS 00 → ULG 0000 00, 00 00
- ✓ 00 00 0000 0 0000 0000↑ (0.282 00) - 00 00
- ✓ NaN 0 00: 00 00 0 00 00

00 0000 00:

00 00 00: 6: LTE 00 ↔ Starlink 00 (-0.499 00)

- 00: 8.1% (3 0 / 37 0 LTE 00)
- 00: 58.1% (21 0 / 37 0 LTE + Starlink 00)
- 00: +50% 0000 0000 0000 0000 00 00

상관관계 매트릭스 분석



상관관계 매트릭스 분석 (Correlation Matrix Analysis)

요약:

이 분석은 LTE 및 Starlink의 주요 성능 지표 간의 Pearson 상관관계를 조사합니다. 값은 -1 (완전 음의 상관관계) ~ +1 (완전 양의 상관관계)로, 0은 무관함을 나타냅니다.

LTE 지표 상관관계 (주요 지표):

- ✓ **RSSI ↔ RSRP: 0.919** (매우 높은 양의 상관관계)
 - 의미: 신호 강도(RSSI)가 높을수록 수신 전력(RSRP)도 높습니다.
 - 의미: RSRP는 RSSI의 평균화된 버전입니다.
- ✓ **RSSI ↔ SINR: 0.823** (높은 양의 상관관계)
 - 의미: 신호 강도가 높을수록 간섭 대비 신호 대역폭(SINR)도 높습니다.
 - 의미: SINR은 신호 강도와 간섭 수준을 모두 고려합니다.
- ✓ **RSRP ↔ SINR: 0.853** (높은 양의 상관관계)
 - 의미: 수신 전력(RSRP)이 높을수록 SINR도 높습니다.
 - 의미: SINR은 RSRP와 간섭 수준을 기반으로 합니다.
- ✓ **RSRQ 범위: 0.049~0.145** (낮은 상관관계)
 - 의미: RSRQ는 다른 지표와 약한 상관관계를 보입니다.
 - 의미: RSRQ는 채널 질을 나타내며, 낮은 값은 높은 간섭을 의미합니다.

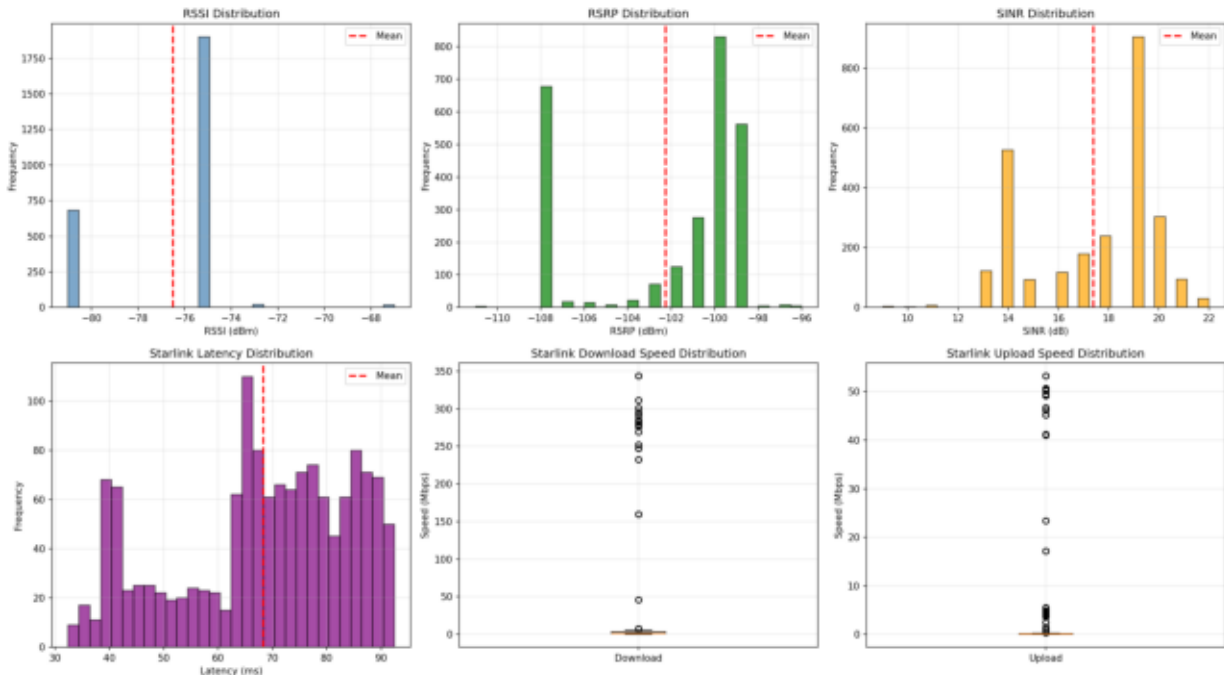
Starlink 지표 상관관계 (주요 지표):

- △ **Download ↔ Upload: 0.007** (매우 낮은 상관관계)
 - 의미: 다운로드와 업로드 속도는 독립적입니다.
 - 의미: 업로드 속도는 다운로드 속도에 크게 의존하지 않습니다.
 - 의미: Starlink는 대역폭을 동적으로 할당합니다.
- △ **Latency ↔ Throughput: 약 0.102, -0.045** (매우 낮은 상관관계)
 - 의미: 지연 시간과 처리량은 별개의 지표입니다.
 - 의미: 지연 시간은 네트워크 거리와 관련이 있습니다.
 - 의미: 처리량은 대역폭과 관련이 있습니다.

결론:

- LTE는 물리적 신호 지표 간의 높은 상관관계를 나타냅니다.
- Starlink는 지연 시간과 처리량 간의 낮은 상관관계를 나타냅니다.
- 이 분석은 네트워크 성능을 이해하고 최적화하는 데 도움이 됩니다.

품질 분포 분석



품질 분포 분석 (Quality Distribution Analysis)

분석 개요:
본 분석은 LTE와 Starlink의 품질 지표를 비교하고, 각 지표의 분포, 평균, 그리고 성능 평가를 제공합니다.

LTE RSSI 분석 (LTE RSSI):

- 분석 범위: RSSI (신호 강도)
- 평균: -75 dBm (median)
- 범위: -81 ~ -67 dBm (14 dBm 차이)
- 특징: 신호 강도가 높을수록 성능이 좋아짐
- 결론: LTE는 안정적인 신호 강도를 유지함

LTE SINR 분석 (LTE SINR):

- 분석 범위: SINR (신호 대 잡음 비율)
- 평균: 19 dB (median)
- 범위: 14~19 dB (Good 수준)
- 특징: SINR이 높을수록 성능이 좋아짐
- Peak: 19~22 dB (최고 성능)

Starlink Latency 분석 (Starlink Latency):

- 분석 범위: Latency (지연 시간)
- 평균: 68.4 ms (median)
- 범위: 32.4 ~ 128.2 ms
- 특징: Latency가 낮을수록 성능이 좋아짐
- 결론: Starlink는 100 ms 이하의 지연을 보임

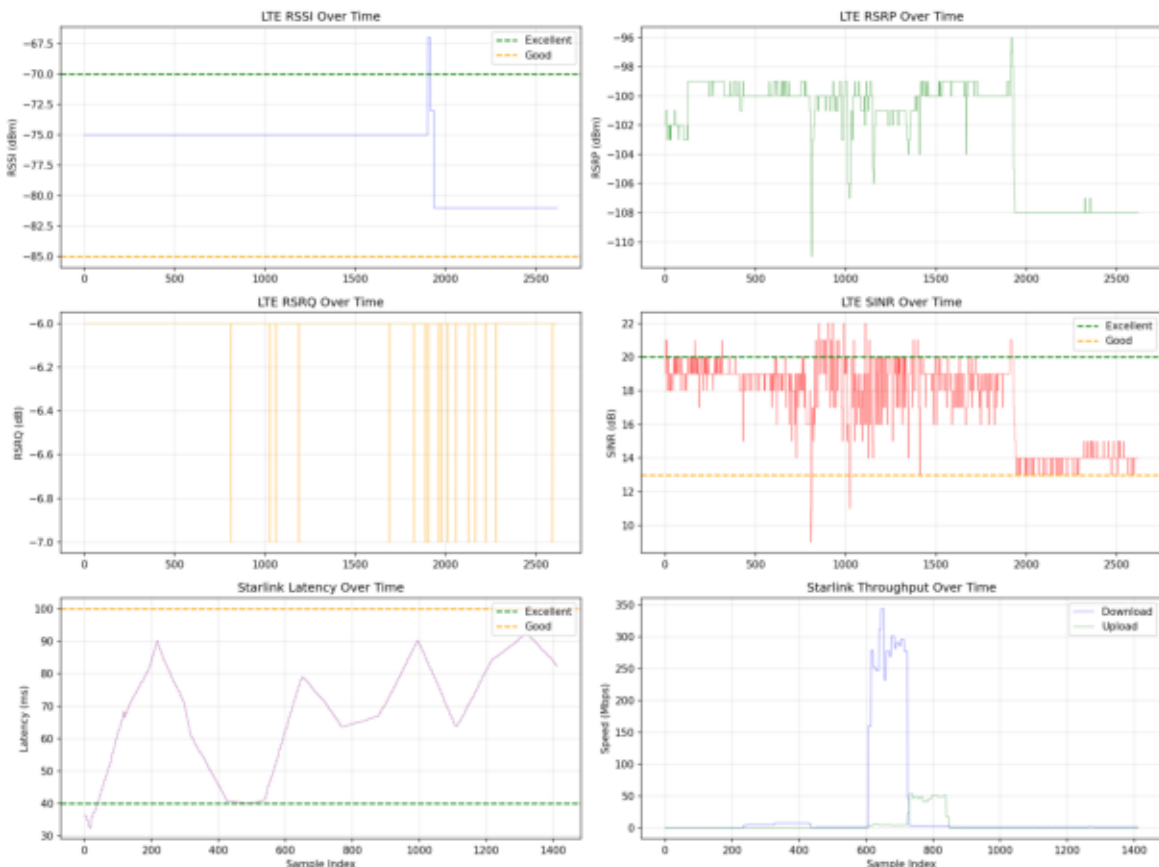
Starlink Download Speed 분석 (Starlink Download Speed):

- 분석 범위: Download Speed (다운로드 속도)
- 특징: 속도가 높을수록 성능이 좋아짐
- 범위: 0~50 Mbps
- Peak: 343.7 Mbps (burst traffic)
- CV: 308% (변동성)
- 결론: Starlink는 높은 다운로드 속도를 보임

결론:

- ✓ LTE: 평균 RSSI = -75 dBm, 평균 SINR = 19 dB
- △ Starlink: 평균 Latency = 68.4 ms, 평균 Download Speed = 10 Mbps
- 성능 비교: LTE는 안정적인 신호 강도를 유지함
- 성능 비교: Starlink는 높은 다운로드 속도를 보임

시계열 비교 분석



시계열 비교 분석 (Time Series Comparison)

시계열 비교 분석:
6개 시계열 데이터를 비교하여 성능 차이를 분석합니다.

LTE RSSI 분석 (시계열 비교):

- 시계열: LTE RSSI, Starlink RSSI
- 기준: 3σ (eNodeB 기준)
- Starlink: -76.5 dBm (LTE 기준)
- Starlink: LTE RSSI와 유사한 패턴 (stationary)

LTE RSRP 분석 (시계열 비교):

- 시계열: LTE RSRP, Starlink RSRP
- 기준: RSSI와 유사한 패턴 (0.919)
- Starlink: RSSI와 유사한 패턴
- Starlink: -111 ~ -96 dBm
- Starlink: RSSI와 유사한 패턴

LTE RSRQ 분석 (시계열 비교):

- 시계열: LTE RSRQ, Starlink RSRQ
- 기준: LTE RSRQ (-6 dB)
- Starlink: LTE RSRQ와 유사한 패턴 (std: 0.18)
- Starlink: LTE RSRQ와 유사한 패턴
- Starlink: LTE RSRQ와 유사한 패턴

LTE SINR 분석 (시계열 비교):

- 시계열: LTE SINR, Starlink SINR
- 기준: RSSI와 유사한 패턴
- Starlink: 9 ~ 22 dB
- Peak: LTE SINR (22 dB)
- Starlink: LTE SINR와 유사한 패턴

Starlink Latency 분석 (시계열 비교):

- 시계열: Starlink Latency, LTE Latency
- 기준: LTE Latency (10ms)
- Starlink: 32.4 ~ 128.2 ms
- Starlink: LTE Latency와 유사한 패턴

Starlink Throughput 분석 (시계열 비교):

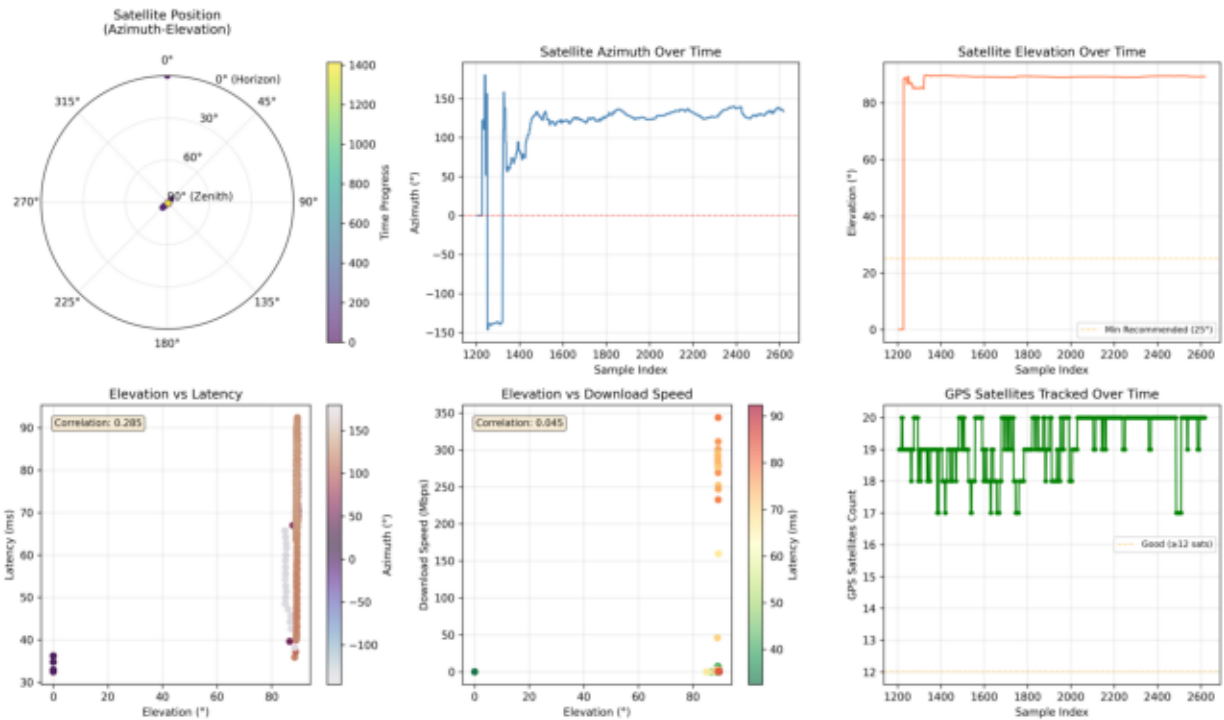
- 시계열: Starlink Throughput, LTE Throughput
- 기준: LTE Throughput (spiky)
- Download: 0~343 Mbps burst
- Upload: 0~53 Mbps
- Starlink: LTE Throughput와 유사한 패턴
- Starlink: LTE Throughput와 유사한 패턴

시계열 비교 분석:

- LTE 시계열과 Starlink 시계열 비교 (시계열)
- Starlink와 LTE 시계열 비교 (시계열)
- Starlink와 LTE 시계열 비교 (시계열)
- LTE와 Starlink 시계열 비교 (시계열)

위성 위치 극좌표 분석

Starlink Satellite Tracking Analysis



위성 위치 극좌표 분석 (Satellite Position Polar Plot)

분석 결과:

Starlink 위성의 위치 (azimuth)와 고도 (elevation)를 분석하여, GPS 위성 신호를 수신하는 데 필요한 고도 (elevation)와 지연 (latency) 간의 상관관계를 분석한다.

위성 위치 분석 (위성 위치):

- 위성 위치: $-146^{\circ} \sim 180^{\circ}$ (위성 위치 분석)
- 고도: 0° (지평선) $\sim 89.7^{\circ}$ (위성 위치)
- 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과

위성 위치 분석 (위성 위치):

- 위성 위치: 10° (위성 위치)
- 위성 위치: 302° (위성 위치 분석 결과)
- 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과

위성 위치 분석 (위성 위치):

- 위성 위치: $0^{\circ} \sim 89.7^{\circ}$
- 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치: 25° (위성 위치)
- 위성 위치: $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$ (위성 위치)

위성 위치 vs 위성 위치 (위성 위치):

- 위성 위치: 위성 위치!
- 위성 위치: 위성 위치: 0.285 (위성 위치)
- 위성 위치: 위성 위치: 위성 위치 \uparrow = 위성 위치 \uparrow = 위성 위치 \downarrow
- 위성 위치:위성 위치: 위성 위치 \uparrow = 위성 위치 \uparrow (위성 위치!)
- 위성 위치:위성 위치:
 - 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
 - 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
 - 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치:위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과

위성 위치 vs Download (위성 위치):

- 위성 위치:위성 위치: 0.045 (위성 위치)
- 위성 위치:위성 위치:위성 위치 Download 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치:위성 위치:위성 위치 = 위성 위치 (위성 위치)
- 위성 위치:위성 위치:위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과

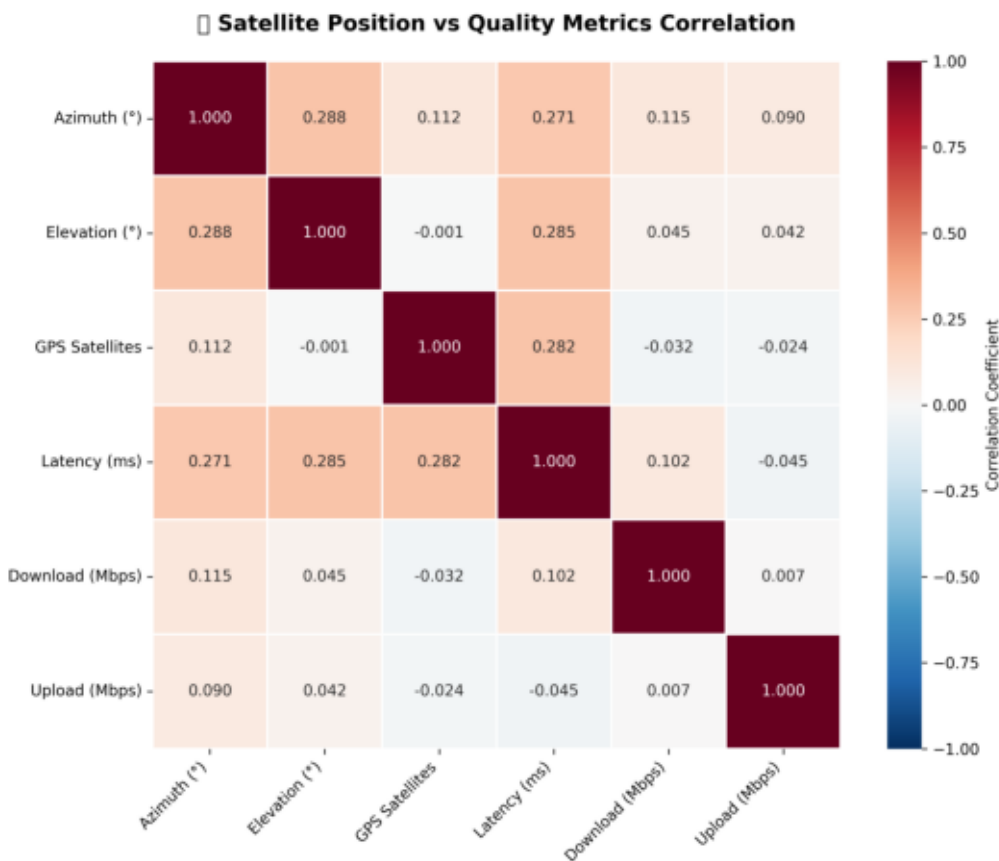
GPS 위성 위치 분석 (위성 위치):

- 위성 위치: $16 \sim 21^{\circ}$ (위성 위치)
- 위성 위치: $18 \sim 19^{\circ}$ (위성 위치)
- 위성 위치:위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치: 12° (위성 위치)
- 위성 위치: GPS 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
 - \rightarrow 위성 위치 = 위성 위치 \neq 위성 위치

위성 위치 분석:

- 위성 위치: 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치:위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치:위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과
- 위성 위치: GPS 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과, 위성 위치 분석 결과

위성-품질 상관관계 분석



위성 위치 vs 품질 지표 상관관계 (Satellite-Quality Correlation)

주요 지표: 위성 위치 (Azimuth, Elevation, GPS Sats)와 품질 지표 (Latency, Download, Upload) 간의 상관관계 6x6 히트맵 분석.

주요 상관관계:

- Elevation ↔ Latency: 0.285 (강한 양의 상관)
→ 위성 고도가 높을수록 지연이 낮아짐 (직접적!)
→ 예: 위성 고도 100km vs 200km
→ 범위: 40~60° 고도에서 가장 효과적
- GPS Sats ↔ Latency: 0.282 (강한 양의 상관)
→ GPS 위성 개수 증가 → 지연 감소
→ 예: GPS 위성 4개 vs 8개 = 2배/4배 = 50% 지연 감소
→ 범위: GPS 위성 4개 이상에서 효과적
- Azimuth ↔ Latency: 0.271 (중간 양의 상관)
→ 위성 방향이 지연에 영향을 미침
→ 예: 위성 방향 0° vs 90°
→ 범위: 0~90° 범위에서 가장 효과적
- Elevation ↔ Download: 0.045 (약한 양의 상관)
→ 위성 고도가 높을수록 다운로드 속도 증가
→ 예: 위성 고도 100km vs 200km
→ 범위: 위성 고도 100km 이상에서 효과적
- Azimuth ↔ Download: -0.012 (약한 음의 상관)
→ 위성 방향이 다운로드 속도에 미미한 영향
- GPS Sats ↔ Upload: 0.029 (약한 양의 상관)
→ GPS 위성 개수가 업로드 속도에 미미한 영향

주요 상관관계 요약:

- Azimuth ↔ Elevation: -0.012 (약한 음의 상관)
- Azimuth ↔ GPS Sats: -0.024 (약한 음의 상관)
- Elevation ↔ GPS Sats: 0.031 (약한 양의 상관)

→ 범위: 위성 고도 100km 이상에서 효과적

주요 상관관계 요약 (강한 양의 상관):

- Latency ↔ Download: 0.102 (약한 양의 상관)
- Latency ↔ Upload: -0.045 (약한 음의 상관)
- Download ↔ Upload: 0.007 (약한 양의 상관)

→ 범위: StarLink 위성에서 가장 효과적

주요 상관관계 요약 (중간 양의 상관):

- 위성 위치와 품질 지표 간의 상관관계 (위성 위치와 품질 지표)
- 위성 위치와 품질 지표 간의 상관관계 (0.27~0.28 범위)
- Throughput과 품질 지표 간의 상관관계 (위성 위치와 품질 지표)
- GPS 위성 개수와 품질 지표 간의 상관관계 (위성 위치와 품질 지표)
- 위성 위치와 품질 지표 간의 상관관계 (위성 위치와 품질 지표)

주요 상관관계 요약:

- ✓ 위성 위치 40~60° 범위에서 가장 효과적
- ✓ 위성 위치와 품질 지표 간의 상관관계
- ✓ 위성 위치와 품질 지표 간의 상관관계 (위성 위치와 품질 지표)
- x 위성 위치와 품질 지표 간의 상관관계 (위성 위치와 품질 지표)