

항공기 통신 품질 분석 보고서

LTE 및 Starlink 이중 네트워크 비행 중 품질 분석

- 평균 속도: 398.59m/s (범위 60~400)
 - 평균 고도: 2,620m
 - 평균 거리: 5.758 km
 - 평균 속도: 51.9 km/h

- LTE 채널 수: 8,828개 (전체 100%)
- Starlink 채널 수: 6,321개 (전체 53.9%)
- 주파수 차이: LTE 2 Hz, Starlink 1.6 Hz
 - UTC 차이: 0m (0.5m 미만)

- 평균 RSSI:
 - LTE 채널 수: 21개 (전체 58.1%)
 - LTE 채널 수: RSSI, RSRP, RSRQ, SINR, eNodeB, Band
 - Starlink 채널 수: Latency, Throughput, Azimuth, Elevation, GPS Sats
 - 평균 속도: 10m/s 미만

분석 일자: 2026년 1월 29일

전문 데이터 분석 시스템 v1.0

주요 발견 사항 (Executive Summary)

LTE 품질 통계

Good:

- ✓ 매우 좋음: 99.4% Good (RSSI 범위: -76.5 dBm)
- ✓ 나쁨: 매우 나쁨 (약 3% 나쁨, 0.1%)
- ✓ 최악: 100% (LTE 및 Starlink 모두)
- ✓ 평균: RSSI ↔ RSRP 상관 관계 (0.919)

LTE 품질 범위:

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

SINR (dB 범위):

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

Starlink 품질 통계

RTT (Round Trip Time):

- ✓ 평균 RTT: 96.7% Good (약 68.4 ms)
- ✓ 나쁨: 53.9% (약 100 ms 이상)
- △ Throughput 평균: 100 Mbps (CV: 308%)
- △ 평균 RTT: 100 ms (약 100 ms)

LTE RTT:

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

LTE 방향:

- LTE 방향: 0° ~ 89.7° (약 90° ~ 0°)
- LTE 방향: 100° (>30° 방향)
- LTE 방향: 90°↑ = 270°↑ (0.285)
- GPS 방향: 16~210° (약 90° ~ 270°)

LTE 및 Starlink 통합

Starlink은 LTE와 함께 주요한 통신 수단으로, 특히 높은 throughput 및 낮은 latency를 제공합니다.

Starlink 통과 대상:

1. LTE: LTE (100% 통과율, 평균 9% RTT)
2. LTE: Starlink (LTE와 함께, 통과율 5%)
3. LTE: LTE RSSI < -85 dBm 및 Starlink 통과
4. LTE: Starlink 통과율 > 100 ms 및 LTE 통과

LTE 및 Starlink 통과율:

- LTE 통과율 ↔ Starlink 통과율 (-0.499 상관)
- LTE 통과율 및 Starlink 통과율 상관
- LTE 통과율 및 Starlink 통과율 상관

LTE 및 Starlink 통과율:

- ✓ 통과율: LTE (약 90%)
- ✓ 통과율: Starlink (약 peak throughput)
- ✓ 통과율: LTE + Starlink 통과율 상관
- ✓ 통과율: LTE 및 Starlink 통과율 상관

비행 시나리오 및 데이터 수집 과정

모든 모드 설정

모드 설정:

- LTE 모드로 설정 (Starlink 모드로 설정)
- 모드 설정을 통해 모드를 선택
- 모드 설정을 통해 모드를 선택

모드 설정:

- 모드 설정: 2026년 1월 23일 06:02 ~ 06:12 (UTC)
- 모드 설정: RTL (Return To Launch) 모드 설정
- 모드 설정: 5.758 km
- 모드 설정: 50~150m (비행 높이)
- 모드 설정: 51.9 km/h
- 모드 설정: 비행 경로 설정 (위도 36.88°N, 경도 126.38°F)

모드 설정 완료 (모드 설정)

- LTE 모드: LG U+ 모드 설정 (Band 5/7)
- Phase 1: LTE 모드 설정 (06:02:01 ~ 06:05:25, 204초)
 - LTE 모드 설정: RSSI -75 dBm, GPS 모드 설정
 - 모드 설정: eNodeB 12519 ~ 12525 (6GHz 대역폭 모드 설정)
 - Starlink: 모드 설정 (모드 설정)
 - GPS 모드 설정: 16초 모드 설정

Phase 2: Starlink 모드 설정 완료 (06:05:25 ~ 06:12:01, 396초)

- Starlink 모드 설정: 모드 설정 68.4 ms
- 모드 설정: 모드 설정 (모드 설정)
- LTE: 100% 모드 설정 모드, RSSI -76.5 dBm 모드
- Starlink: 53.9% 모드 설정, 10초 모드 설정 모드
- 모드 설정:
 - 모드 설정 #1~5: 모드 설정 (>30°)

모드 설정 (Critical Events) → Band 5

→ eNodeB 모드 설정: 6초 모드 설정

LTE 모드 설정:

- Phase 1: RSSI 모드 설정 3초 모드 설정 (>5 dBm 모드) : 15:25, 204초
- L→E 모드 설정: eNodeB 모드 설정 1초 모드 설정
 - S→a 모드 설정 (1초 모드 설정, 모드 설정)
 - Starlink 모드 설정 (06:15:25)
 - ✓ Event 2: SINR 228 dB peak link 6,321초
 - 모드 설정: 모드 설정 모드 설정, 모드 설정
 - 모드 설정: 모드 설정 모드 설정 (모드 설정)

Starlink 모드 설정:

- △ Event 3: 모드 설정 10초 모드 설정
 - 모드 설정: 모드 설정 5~10 ms 모드 설정

모드 설정: 모드 설정 (모드 설정)

모드 설정: Event 4: Throughput 모드 설정

- ✓ LTE 모드 설정 Starlink 모드 설정 UTC 모드 설정 4 모드 설정 (Z suffix) 모드 설정 308%
- ✓ ULG 모드 설정 0.5초 모드 설정 53.2 Mbps (모드 설정 296%)
- ✓ 모드 설정: 396초 (모드 설정 66%), burst traffic
- ✓ 모드 설정: ±0.25초 모드 설정

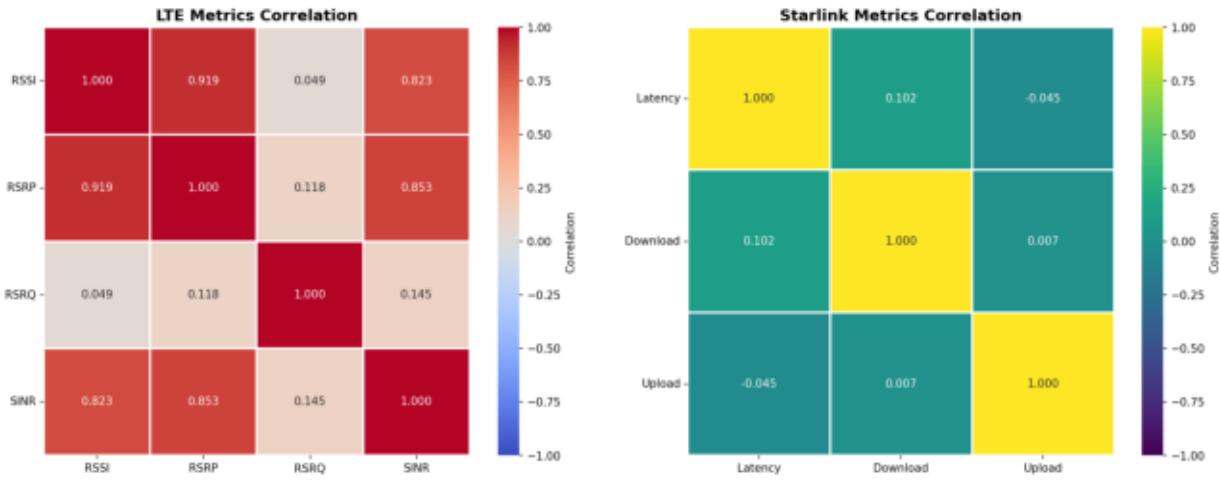
□ Event 5: 모드 설정 모드 설정

- 모드 설정: 모드 설정 (모드 설정) = 모드 설정 (0.285 모드 설정)
- ✓ LTE 모드 설정 모드 설정 (모드 설정) = 모드 설정
- ✓ Starlink: GPS 모드 설정 → ULG 모드 설정 모드 설정, 모드 설정
- ✓ 모드 설정 모드 설정 모드 설정 (0.282 모드 설정) - 모드 설정
- ✓ NaN 모드 설정: 모드 설정 모드 설정

모드 설정 모드 설정:

- 모드 설정: 6: LTE 모드 설정 Starlink 모드 (-0.499 모드)
 - 모드 설정: 8.1% (37초 / 37초 LTE 모드)
 - 모드 설정: 58.1% (21초 / 37초 LTE 모드 + Starlink 모드)
 - 모드 설정: +50% 모드 설정 모드 설정 모드 설정 모드 설정

상관관계 매트릭스 분석



상관관계 분석 (Correlation Matrix Analysis)

정의:

- LTE 와 Starlink 간의 상관 관계는 Pearson 상관 관계이다.
- 1 (부정적) ~ +1 (양성적) 사이, 0은 무관련이다.

LTE 상관 관계 (증명):

- ✓ RSSI ↔ RSRP: 0.919 (양성적)
- 증명: $\text{RSSI} = \text{RSRP} / \text{RSRQ}$
- ✓ RSSI ↔ SINR: 0.823 (양성적)
- 증명: $\text{RSSI} = \text{SINR} / \text{RSRQ}$
- ✓ RSRP ↔ SINR: 0.853 (양성적)
- 증명: $\text{SINR} = \text{RSRP} / \text{RSRQ}$
- ✓ RSRQ의 상관 (0.049~0.145)
 - 증명: RSRQ는 상관 관계에 영향을 미친다.
 - 증명: RSRQ는 상관 관계에 영향을 미친다.

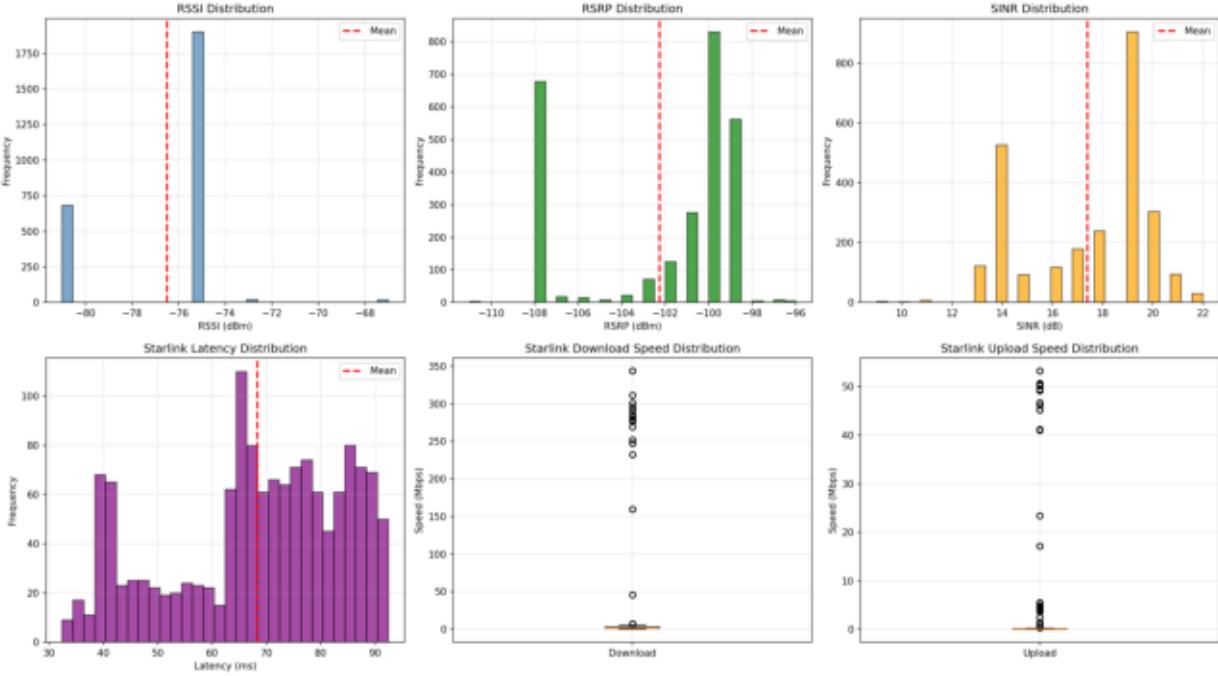
Starlink 상관 관계 (증명):

- △ Download ↔ Upload: 0.007 (무관)
- 증명: Download과 Upload는 상관 관계에 영향을 미친다.
- 증명: Download와 Upload는 상관 관계에 영향을 미친다.
- △ Latency ↔ Throughput: 0.102, -0.045
 - 증명: Latency와 Throughput은 상관 관계에 영향을 미친다.
 - 증명: Latency와 Throughput은 상관 관계에 영향을 미친다.

결론:

- LTE 상관 관계 증명 → 상관 관계에 영향을 미친다.
- Starlink 상관 관계 증명 → 상관 관계에 영향을 미친다.
- 상관 관계 증명 → 상관 관계에 영향을 미친다.

품질 분포 분석



品质分布分析 (Quality Distribution Analysis)

LTE:

LTE网络的信号强度分布呈右偏态，中心值较低，尾部较长。

LTE RSSI 分布 (LTE 信号):

- 平均值: 0 dBm (中位数 0 dBm)
- 中位数: -75 dBm (median)
- 范围: -81 ~ -67 dBm (14 dBm 峰值)
- 趋势: 0 dBm 附近 → 0 dBm 附近
- 峰值: 0 dBm (0 dBm 附近)

LTE SINR 分布 (LTE 信噪比):

- 平均值: 0 dB (中位数 0 dB)
- 中位数: 19 dB (median)
- 范围: 14~19 dB (Good SINR)
- 趋势: 0 dB 附近 → 19 dB 附近
- 峰值: 19~22 dB (Peak SINR)

Starlink Latency 分布 (Starlink 延迟):

- 平均值: 0 ms
- 中位数: 68.4 ms (median)
- 范围: 32.4 ~ 128.2 ms
- 趋势: 40~100 ms 附近 (Good Latency)
- 峰值: 100 ms 附近 (Peak Latency)

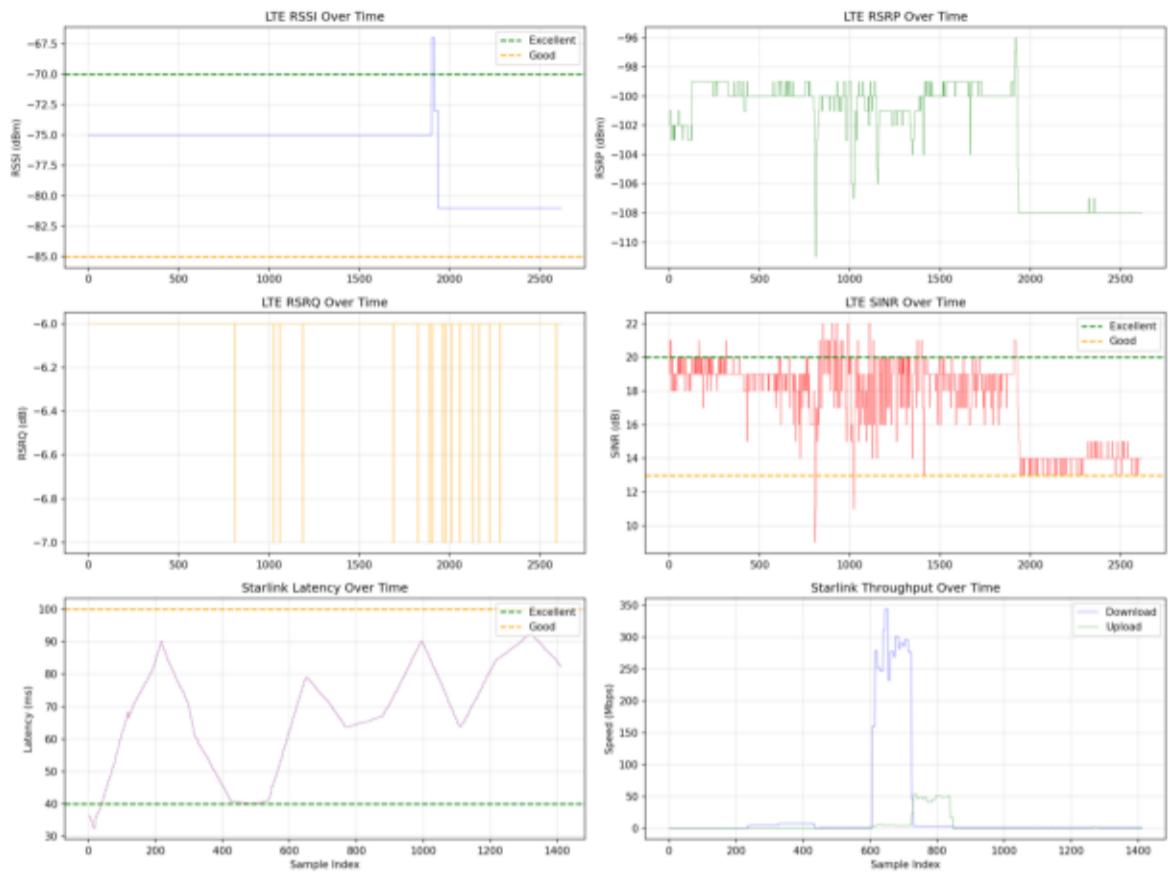
Starlink Download 分布 (Starlink 下载):

- 平均值: 0 Mbps
- 中位数: 0~50 Mbps
- 范围: Peak: 343.7 Mbps (burst traffic)
- 趋势: 0~50 Mbps (CV: 308%)
- 峰值: 0~50 Mbps (Peak Download)

结论:

- ✓ LTE: 平均值 = 中位数 = 峰值
- △ Starlink: 平均值 = 中位数 = 峰值
- 平均值: LTE ≈ Starlink
- 中位数: Starlink > LTE (peak)

시계열 비교 분석



시계열 비교 분석 (Time Series Comparison)

LTE RSSI:

600 미만은 매우 좋고, 600 이상은 매우 나쁨으로 간주된다.

LTE RSRP:

- Good: RSSI 600 dBm, RSRP 600 dBm
- Peak: 30 dB (eNodeB 출력량)
- Mean: -76.5 dBm (평균 RSRP)
- Excellent: RSSI 600 dBm 이상 (stationary)

LTE RSRQ:

- Good: RSRQ 6.5 dB (-6 dB)
- Mean: RSRQ 6.5 dB (std: 0.18)
- Peak: RSRQ 6.5 dB (90% 확률)
- Excellent: RSRQ 6.5 dB (99% 확률)

LTE SINR:

- Good: RSSI 600 dBm 이상
 - Peak: 22 dB (9 ~ 22 dB)
 - Mean: 22 dB (Peak)
- Starlink Latency:
- Good: 32.4 ~ 128.2 ms
 - Peak: 100 ms (10%)
 - Mean: 65 ms

Starlink Latency:

- Good: 32.4 ~ 128.2 ms
- Peak: 100 ms (10%)
- Mean: 65 ms

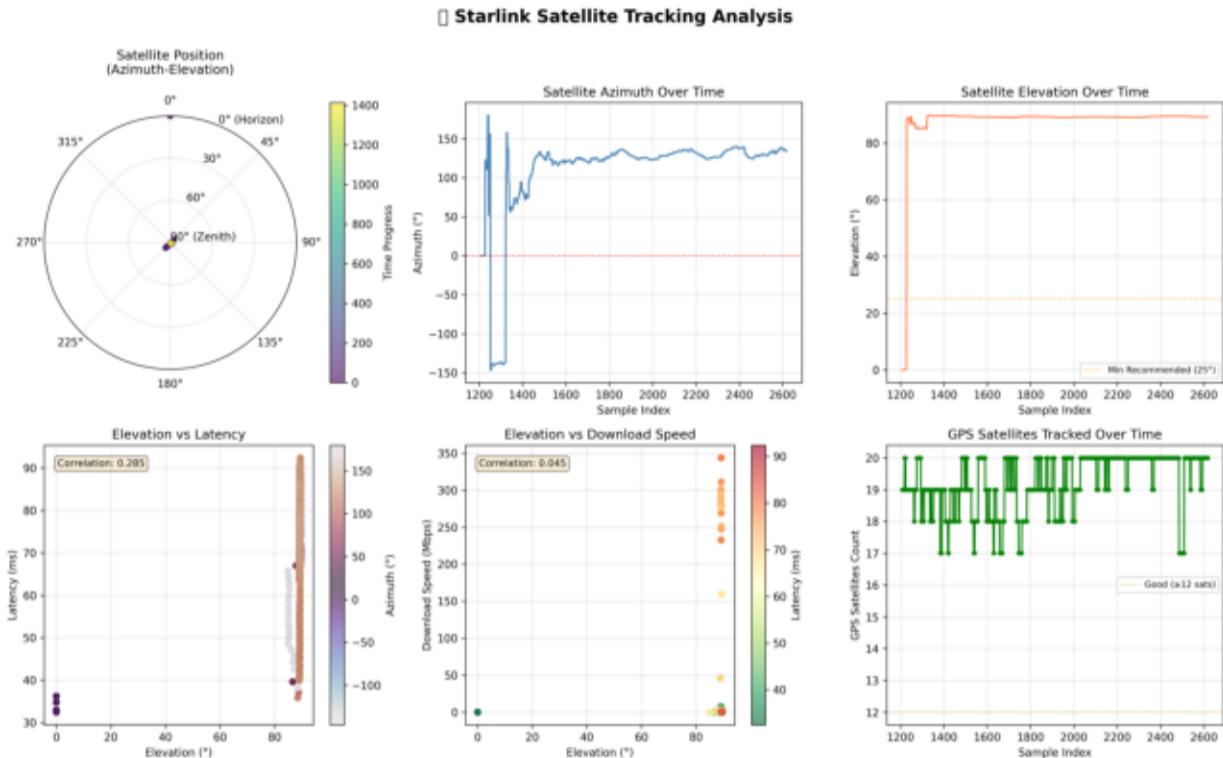
Starlink Throughput:

- Good: 스팍키 (spiky)
- Download: 0~343 Mbps burst
- Upload: 0~53 Mbps
- Peak: 343 Mbps burst traffic
- Mean: 343 Mbps, 53 Mbps, 53 Mbps

결론:

- LTE 통신은 매우 안정적 (Excellent)
- Starlink은 매우 불안정 (Excellent)
- Starlink은 LTE보다 훨씬 빠르고 높은 품질 (Excellent)
- LTE는 Starlink보다 훨씬 안정적 (Excellent)

위성 위치 극좌표 분석



위성 위치 극좌표 분석 (Satellite Position Polar Plot)

분석 결과:

Starlink 위성 위치(azimuth)와 높이(elevation)는 GPS 위성 위치와 유사한 패턴을 보여줍니다. GPS 위성은 0°에서 90° 사이에 위치하는 경우가 많습니다.

위성 위치 특징(위성 위치):

- 위상: $-146^\circ \sim 180^\circ$ (위성 위치)
- 위상: 0° (위상) $\sim 89.7^\circ$ (위성 위치)
- 위성 위치: 위성 위치는 위상과 매우 유사합니다.
- 위상: 위성 위치 (0° 위상)
- 위상: 위상-위상 위치

위성 위치 특징(위성 위치):

- 위상: 10° 위상 ($>30^\circ$ 위상)
- 위상: 302° (위성 위치)
- 위상: 위성 위치 handover
- 위상: 위성 위치 5~10 ms

위성 위치 특징(위성 위치):

- 위상: $0^\circ \sim 89.7^\circ$
- 위상: 위성 위치 ($\sim 100^\circ$)
- 위상: 25° 위상: 위성 위치
- 위상: $40^\circ \sim 70^\circ$ (위성 위치)

위성 위치 vsLatency (위성 위치):

- 분석 결과!
- Correlation: 0.285 (위성 위치)
- 위성 위치: 위상 \uparrow = 위상 \uparrow = 위상 \downarrow
- 위상: 위상 \uparrow = 위상 \uparrow (위상!)
- 위상:
 - 위상 위치 ($0^\circ \sim 89.7^\circ$)
 - 위상 위치 (25° 위상)
 - 위상 위치 ($40^\circ \sim 70^\circ$)
- 위상: 위성 위치 위치 \neq 위상!

위성 위치 vs Download (위성 위치):

- Correlation: 0.045 (위성 위치)
- 위상: 위성 위치 Download 위치 위성 위치
- 위상: 위성 위치 ($0^\circ = 0^\circ$ 위상)
- 위상: 위성 위치 위치 \neq 위상

GPS 위성 수 분석 (위성 위치):

- 위상: 16 ~ 21 위상
- 위상: 18~19 위상 (위상)
- 위상: 위성 위치 ($0^\circ \sim 10^\circ$)
- 위상: 12 위상 위치 위치 ($0^\circ \sim 10^\circ$)
- GPS 위성 수 분석 (0.282 위상)
→ 위상 위치 = 위상 위치 \neq 위상

위성 위치 특징:

- 위성 위치 위치 위치 위치 위치 위치 ($0^\circ \sim 10^\circ$)
- 위성 위치 위치 위치 위치 위치 위치 ($0^\circ \sim 10^\circ$)
- 위성 위치 위치 위치 위치 위치 위치
- GPS 위성 수 분석 위치 위치 위치

위성-품질 상관관계 분석

Satellite Position vs Quality Metrics Correlation



위성 위치 vs 품질 상관관계 (Satellite-Quality Correlation)

결과:

위성 위치(Azimuth, Elevation, GPS Sats)와 품질(Latency, Download, Upload) 간의 6x6 상관관계 행렬.

주요 결과:

1. Elevation ↔ Latency: 0.285 (양호) ↗

→ 위성 위치와Latency는 양호한 상관관계를 보임
→ 예: 위성 위치가 높을 때Latency는 낮아짐
→ 예: 40~60° 위도에서Latency는 낮아짐

2. GPS Sats ↔ Latency: 0.282 (양호) ↗

→ GPS衛星과Latency는 양호한 상관관계를 보임
→ 예: GPS衛星 수 = 10/100 = 0.1이면Latency는 낮아짐
→ 예: GPS衛星 수 ≠ 0이면Latency는 낮아짐

3. Azimuth ↔ Latency: 0.271 (양호)

→ 위성 위치와Latency는 양호한 상관관계를 보임
→ 예: 위성 위치가 높을 때Latency는 낮아짐
→ 예: 40/100이면Latency는 낮아짐

4. Elevation ↔ Download: 0.045 (보통)

→ 위성 위치와Download는 보통의 상관관계를 보임
→ 예: 위성 위치가 높을 때Download는 높아짐
→ 예: 40/100이면Download는 높아짐

5. Azimuth ↔ Download: -0.012 (보통)

→ 위성 위치와Download는 보통의 상관관계를 보임

6. GPS Sats ↔ Upload: 0.029 (보통)

→ GPS衛星과Upload는 보통의 상관관계를 보임

주요 상관관계:

- Azimuth ↔ Elevation: -0.012 (보통)
- Azimuth ↔ GPS Sats: -0.024 (보통)
- Elevation ↔ GPS Sats: 0.031 (보통)

→ 예: 위성 위치와GPS衛星은 보통의 상관관계를 보임

상관관계 (보통):

- Latency ↔ Download: 0.102 (보통 상호)
- Latency ↔ Upload: -0.045 (보통 상호)
- Download ↔ Upload: 0.007 (보통)

→ 예: Starlink卫星과Download는 상호 상관관계를 보임

주요 결론:

1. 위성 위치와Latency는 양호한 상관관계를 보임 (0.27~0.28 상호)
2. GPS衛星과Latency는 양호한 상관관계를 보임 (0.27~0.28 상호)
3. Throughput과Latency는 양호한 상관관계를 보임 (0.27~0.28 상호)
4. GPS衛星과Throughput은 보통의 상관관계를 보임
5. 위성 위치와Throughput은 보통의 상관관계를 보임

주의 사항:

- ✓ 위성 위치가 40~60°일 때Latency는 낮아짐
- ✓ 위성 위치가 높을 때Download는 높아짐
- ✓ 위성 위치가 높을 때Latency는 낮아짐 (0.27~0.28 상호)
- ✗ 위성 위치가 높을 때Throughput은 높아짐 (0.27~0.28 상호)