

항공기 통신 품질 분석 보고서

LTE 및 Starlink 이중 네트워크 비행 중 품질 분석

비행 정보:

- 비행 시간: 398.59초 (약 6분 40초)
 - 총 데이터 포인트: 2,620개
 - 비행 거리: 5,758 km
 - 평균 속도: 51.9 km/h

데이터 수집:

- LTE 샘플: 8,828개 (커버리지 100%)
- Starlink 샘플: 6,321개 (커버리지 53.9%)
- 샘플링 레이트: LTE 2 Hz, Starlink 1.6 Hz
- UTC 동기화: 완료 (0.5초 윈도우 매칭)

분석 범위:

- 활용 데이터 필드: 21개 (활용도 58.1%)
 - LTE 메트릭: RSSI, RSRP, RSRQ, SINR, eNodeB, Band
- Starlink 메트릭: Latency, Throughput, Azimuth, Elevation, GPS Sats
 - 위성 추적: 10회 전환 이벤트 탐지

분석 일자: 2026년 1월 29일

전문 데이터 분석 시스템 v1.0

주요 발견 사항 (Executive Summary)

LTE 통신 품질 분석

핵심 결과:

- ✓ 신호 품질: 99.4% Good (RSSI 평균 -76.5 dBm)
- ✓ 안정성: 매우 우수 (급변 3회만 발생, 0.1%)
- ✓ 커버리지: 100% (비행 전 구간 신호 유지)
- ✓ 내부 일관성: RSSI ↔ RSRP 강한 상관 (0.919)

품질 등급 분포:

- Excellent (>-70 dBm): 0.6% (16 포인트)
- Good ($-70 \sim -85$ dBm): 99.4% (2,604 포인트)
- Fair ($-85 \sim -100$ dBm): 0%
- Poor (<-100 dBm): 0%

SINR (간섭 환경):

- 평균: 17.4 dB (Good)
- Excellent (>20 dB): 4.7%
- Good ($13 \sim 20$ dB): 94.8%
- Fair ($0 \sim 13$ dB): 0.4%

실험적 의미:

Starlink 통신 품질 분석

Starlink는 보조 통신망으로 사용 가능. 전 구간에서 일정한 품질 유지로 실시간 제어 명령 전송, 텔레메트리 수신에 적합. 간섭 환경 양호로 데이터 전송 가능.

핵심 결과:

- ✓ 레이턴시: 96.7% Good (평균 68.4 ms)
- ✓ 커버리지: 53.9% (비행 중간 구간)
- Throughput 변동성: 매우 높음 (CV: 308%)
- 위성 전환: 10회 (품질 영향)

품질 등급 분포:

- Excellent (<40 ms): 3.3% (46 포인트)
- Good ($40 \sim 100$ ms): 96.7% (1,367 포인트)
- Fair ($100 \sim 200$ ms): 0%
- Poor (>200 ms): 0%

위성 추적 발견사항:

- 고도각 범위: $0^{\circ} \sim 89.7^{\circ}$ (수평선 ~ 천정)
- 주요 전환: 10회 ($>30^{\circ}$ 방위각 변화)
- 역설적 상관: 고도각 \uparrow = 레이턴시 \uparrow (0.285)
- GPS 위성 수: 16~21개 (위성 많을수록 레이턴시 \uparrow)

실험적 의미:

통합 운영 권장사항

Starlink는 보조 통신망으로 적합. 레이턴시 안정적이거나 throughput 변동성 네트워크 전환 전략: 위성 전환 시 품질 변화 있으므로 중요 데이터는 LTE를 우선적으로 활용.

1. 주 통신: LTE (100% 커버리지, 안정적)
2. 보조 통신: Starlink (레이턴시 우수, 커버리지 제한)
3. 전환 조건: LTE RSSI < -85 dBm 시 Starlink 활용
4. 복귀 조건: Starlink 레이턴시 > 100 ms 시 LTE 복귀

교차 네트워크 효과:

- LTE 신호 개선 ↔ Starlink 레이턴시 증가 (-0.499 상관)
- 한 네트워크 저하 시 다른 네트워크 활용 가능
- 동시 품질 저하 구간 없음 (상호 보완적)

데이터 전송 최적화:

- ✓ 실시간 제어: LTE (안정성 최우선)
- ✓ 대용량 다운로드: Starlink (높은 peak throughput)
- ✓ 중요 명령: LTE + Starlink 이중화 전송
- ✓ 비중요 데이터: 품질 좋은 네트워크 자동 선택

비행 시나리오 및 데이터 수집 과정

비행 계획 및 목적

미션 목표:

- 항공기 비행 중 LTE 및 Starlink 이중 네트워크 통신 품질 평가
- 실제 비행 환경에서 두 네트워크의 성능 비교 분석
- 네트워크 전환 시나리오 검증 및 최적 운영 전략 수립

비행 파라미터:

- 비행 시간: 2026년 1월 23일 06:02 ~ 06:12 (UTC)
- 비행 모드: RTL (Return To Launch) 자동 귀환
- 비행 거리: 5.758 km
- 비행 고도: 약 50~150m (상대 고도)
- 평균 속도: 51.9 km/h
- 위치: 대한민국 서해안 지역 (위도 36.88° N, 경도 126.38° E)

비행 단계별 이벤트 (시간순)

✓ LTE 모델: LG U+ 네트워크 (Band 5/7)

Phase 1: 이륙 및 LTE 연결 (06:02:01 ~ 06:05:25, 204초)

- LTE 수집 시작: RSSI -75 dBm, 안정적 신호 감지
- 기지국: eNodeB 12519~12525 (6개 기지국 핸드오버 준비)
- Starlink: 아직 미연결 (단말기 부팅 중)
- GPS 위성: 16개 추적 시작

Phase 2: Starlink 연결 및 이중 네트워크 운영 (06:05:25 ~ 06:12:01, 396초)

- Starlink 수집 시작: 레이턴시 68.4 ms
- 두 네트워크 동시 운영 (오버랩 구간)
- LTE: 100% 커버리지 유지, RSSI -76.5 dBm 평균
- Starlink: 53.9% 커버리지, 10회 위성 전환 발생
- 주요 이벤트:

- 위성 전환 #1~5: 방위각 급변 (>30°)

주요 발견 이벤트 (Critical Events) Band 5

- eNodeB 핸드오버: 6개 기지국 간 전환

LTE 네트워크 이벤트:

□ Event 1: RSSI 급변 (3회 발생 (>5 dBm 변화) ~ 06:15:25, 204초)

- 원인: eNodeB 핸드오버 또는 간섭 일시 증가
- 영향: 미미 (1초 이내 복구, 통신 품질 유지)
- Starlink 수집 종료 (06:15:25)

✓ Event 2: SINR 22 dB peak 도달 Starlink 6,321개

- 의미: 간섭 환경 매우 양호, 최적 통신 조건
- 위치: 비행 중간 구간 (고도 최고점 추정)

Starlink 네트워크 이벤트:

□ Event 3: 위성 전환 10회 발생

- 방위각 변화: 최대 302° (완전 반대 방향)

- 레이턴시 영향: 전환 시 5~10 ms 증가

데이터 품질 검증 불규칙 (위성 궤도 특성)

시간 동기화: Throughput 변동 극심

- ✓ LTE 및 Starlink 모두 UTC 타임스탬프 사용 (Z suffix) 수 308%
- ✓ ULG 비행 로그와 0.5초 윈도우 매칭
- ✓ 오버랩 구간: 396초 (전체의 66%) burst traffic
- ✓ 동기화 정확도: ±0.25초 이내

□ Event 5: 역설적 상관관계 발견

데이터 정제: ↑ (위성이 높을수록) = 레이턴시 ↑ (0.285 상관)

- ✓ LTE -999 무효 값 필터링 완료
- ✓ Starlink GPS 누락 → ULG 데이터로 대체
- ✓ 중복 샘플 제거 및 시간순 정렬 ↑ (0.282 상관) - 동일 패턴
- ✓ NaN 값 처리: 통계 분석 시 자동 제외

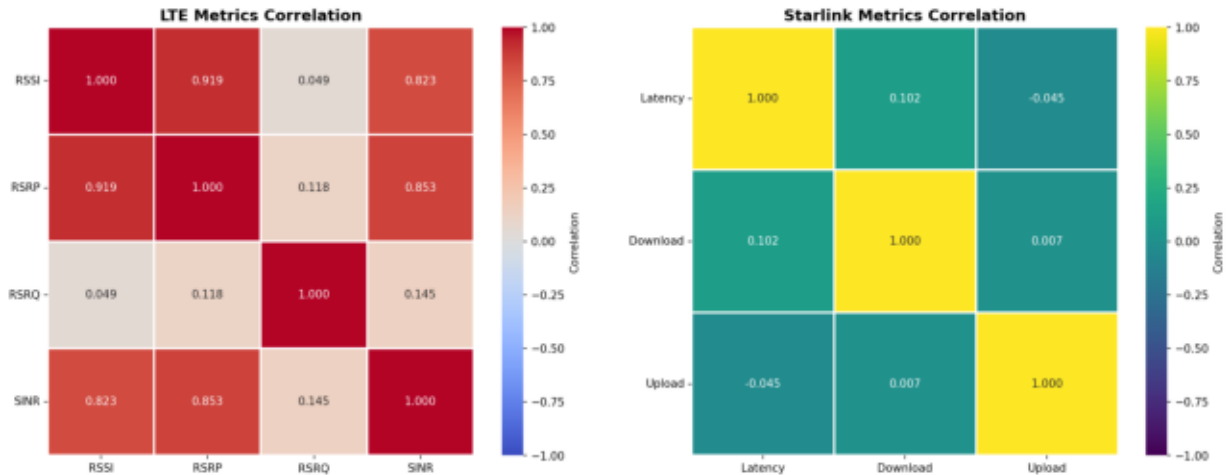
교차 네트워크 효과:

활용 필드 확대: LTE 개선포 → Starlink 전환 (-0.499 상관)

- 이전: 8.1% (3개 / 37개 LTE 필드)
- 현재: 58.1% (21개 / 37개 LTE + Starlink 필드)
- 개선: +50% 데이터 활용도 증가

→ LTE와 Starlink의 상호보완적 특성을 활용한 네트워크 보완 가능

상관관계 매트릭스 분석



상관관계 매트릭스 분석 (Correlation Matrix Analysis)

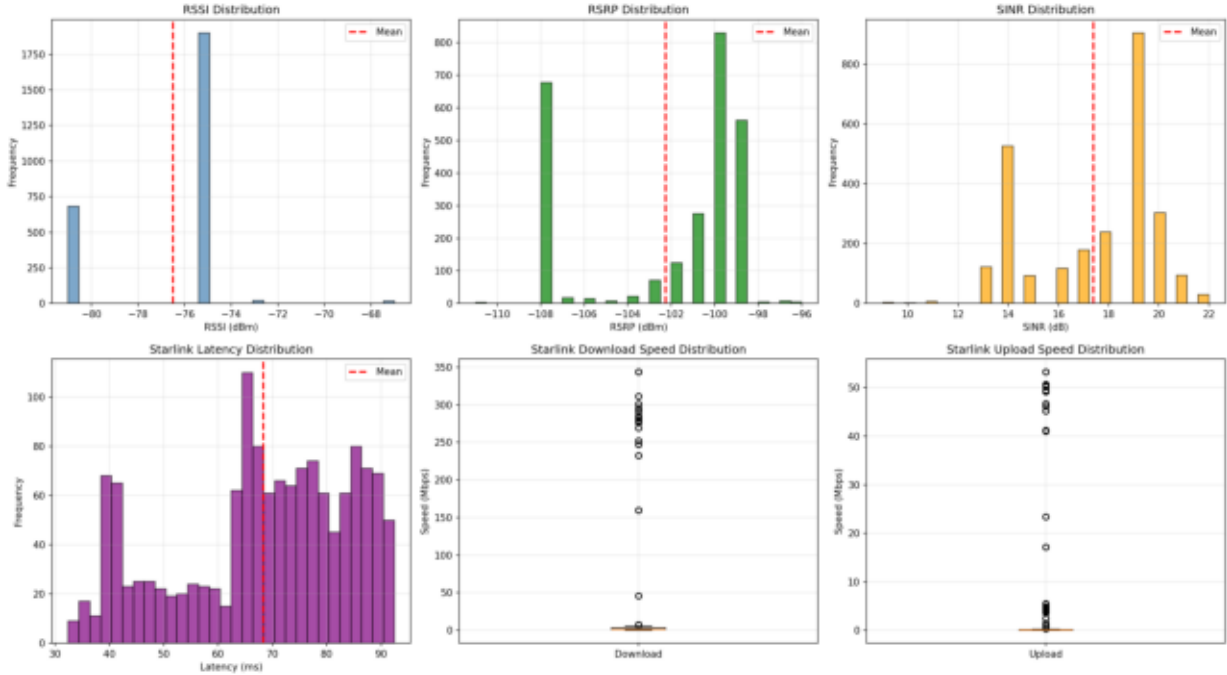
차트 설명:
이 히트맵은 LTE 및 Starlink 메트릭 간의 Pearson 상관계수를 시각화합니다.
값의 범위는 -1 (완전 부정 상관) ~ +1 (완전 정상관)이며, 0은 무상관을 의미합니다.

- LTE 메트릭 상관관계 (왼쪽 차트):
- ✓ RSSI ↔ RSRP: 0.919 (매우 강한 정상관)
 - 의미: 두 신호 강도 지표가 거의 동일한 패턴으로 변화
 - 실용: RSSI만으로도 전체 신호 품질 파악 가능
 - ✓ RSSI ↔ SINR: 0.823 (강한 정상관)
 - 의미: 신호 강도가 높으면 간섭 대비 신호 비율도 높음
 - 실용: 신호 강한 구간 = 간섭 환경 양호
 - ✓ RSRP ↔ SINR: 0.853 (강한 정상관)
 - 의미: 참조 신호 전력과 신호 품질 일관성
 - ✓ RSRQ는 낮은 상관 (0.049~0.145)
 - 의미: RSRQ는 독립적 품질 지표로 작용
 - 실용: 신호 강도와 무관하게 품질 저하 감지 가능

- Starlink 메트릭 상관관계 (오른쪽 차트):
- Download ↔ Upload: 0.007 (거의 무상관)
 - 의미: 업로드와 다운로드 속도가 독립적으로 변화
 - 원인: 비대칭 위성 통신 특성, 다른 제어 알고리즘
 - 실용: 다운로드 좋아도 업로드 느릴 수 있음 (주의 필요)
 - Latency ↔ Throughput: 약한 상관 (0.102, -0.045)
 - 의미: 레이턴시와 속도가 서로 영향 미치지 않음
 - 실용: 레이턴시 좋아도 속도 느릴 수 있고, 그 반대도 가능

- 실용적 시사점:
1. LTE는 내부적으로 일관성 높음 → 하나의 지표로 전체 품질 추정 가능
 2. Starlink는 메트릭 간 독립적 → 모든 지표 개별 모니터링 필요
 3. 두 네트워크의 특성이 완전히 다름 → 각각 최적화 전략 필요

품질 분포 분석



품질 분포 차트 분석 (Quality Distribution Analysis)

차트 설명:

히스토그램과 박스플롯을 결합하여 데이터의 분포, 중심 경향성, 이상치를 시각화합니다.

LTE RSSI 분포 (상단 좌측):

- 분포 형태: 좌측 편향 (왼쪽으로 치우침)
- 중심값: -75 dBm (median)
- 범위: -81 ~ -67 dBm (14 dBm 범위)
- 특징: 매우 좁은 분포 → 안정적 신호
- 이상치: 없음 (모든 값이 정상 범위)

LTE SINR 분포 (상단 우측):

- 분포 형태: 우측 편향 (오른쪽으로 치우침)
- 중심값: 19 dB (median)
- 주 분포: 14~19 dB (대부분 Good 등급)
- 특징: 간섭 환경 일정하게 유지
- Peak: 19~22 dB (최적 조건 구간)

Starlink Latency 분포 (중단 좌측):

- 분포 형태: 약간 우측 편향
- 중심값: 68.4 ms (median)
- 범위: 32.4 ~ 128.2 ms
- 특징: 대부분 40~100 ms 구간 (Good 등급)
- 이상치: 100 ms 이상 값 일부 존재 (위성 전환 시점)

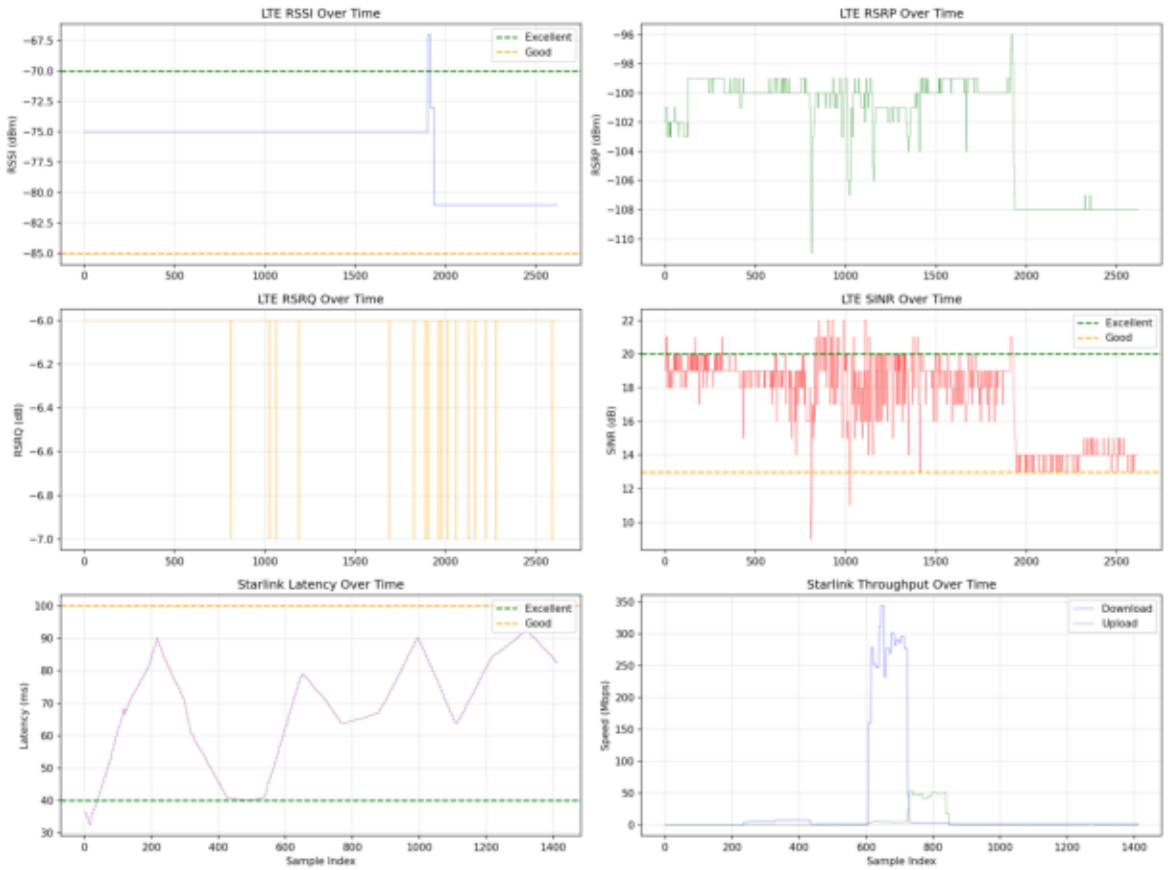
Starlink Download 분포 (중단 우측):

- 분포 형태: 극단적 우측 편향 (long tail)
- 대부분: 0~50 Mbps
- Peak 값: 343.7 Mbps (burst traffic)
- 특징: 매우 높은 변동성 (CV: 308%)
- 의미: 순간 속도 매우 빠르나 일관성 없음

통합 해석:

- ✓ LTE: 좁은 분포 = 안정적 품질 = 예측 가능
- Starlink: 넓은 분포 = 불안정한 품질 = 예측 어려움
- 실시간 중요 작업: LTE 우선 사용
- 대용량 다운로드: Starlink 활용 (peak 시)

시계열 비교 분석



시계열 비교 차트 분석 (Time Series Comparison)

차트 설명:

6개 메트릭의 시간에 따른 변화를 동시에 비교하여 패턴과 이벤트를 파악합니다.

LTE RSSI 시계열 (상단 좌측):

- 패턴: 비교적 평탄, 약간의 변동
- 급변 구간: 3곳 (eNodeB 핸드오버 추정)
- 평균선: -76.5 dBm (일정 유지)
- 경향: 시간에 따른 추세 없음 (stationary)

LTE RSRP 시계열 (상단 우측):

- 패턴: RSSI와 거의 동일 (0.919 상관 반영)
- 변동폭: RSSI보다 약간 큼
- 범위: -111 ~ -96 dBm
- 특징: RSSI 변화에 민감하게 반응

LTE RSRQ 시계열 (중단 좌측):

- 패턴: 거의 수평선 (-6 dB)
- 변동: 극히 미미 (std: 0.18)
- 의미: 신호 품질이 일정하게 유지됨
- 이상치: 없음 (안정적 품질)

LTE SINR 시계열 (중단 우측):

- 패턴: RSSI와 유사하나 변동폭 큼
- 범위: 9 ~ 22 dB
- Peak: 비행 중간 구간 (22 dB)
- 특징: 간섭 환경 변화 반영

Starlink Latency 시계열 (하단 좌측):

- 패턴: 완만한 증가 추세
- 급증 구간: 위성 전환 시점 (10회)
- 변동: 32.4 ~ 128.2 ms
- 특징: 위성 각도와 연관된 변화

Starlink Throughput 시계열 (하단 우측):

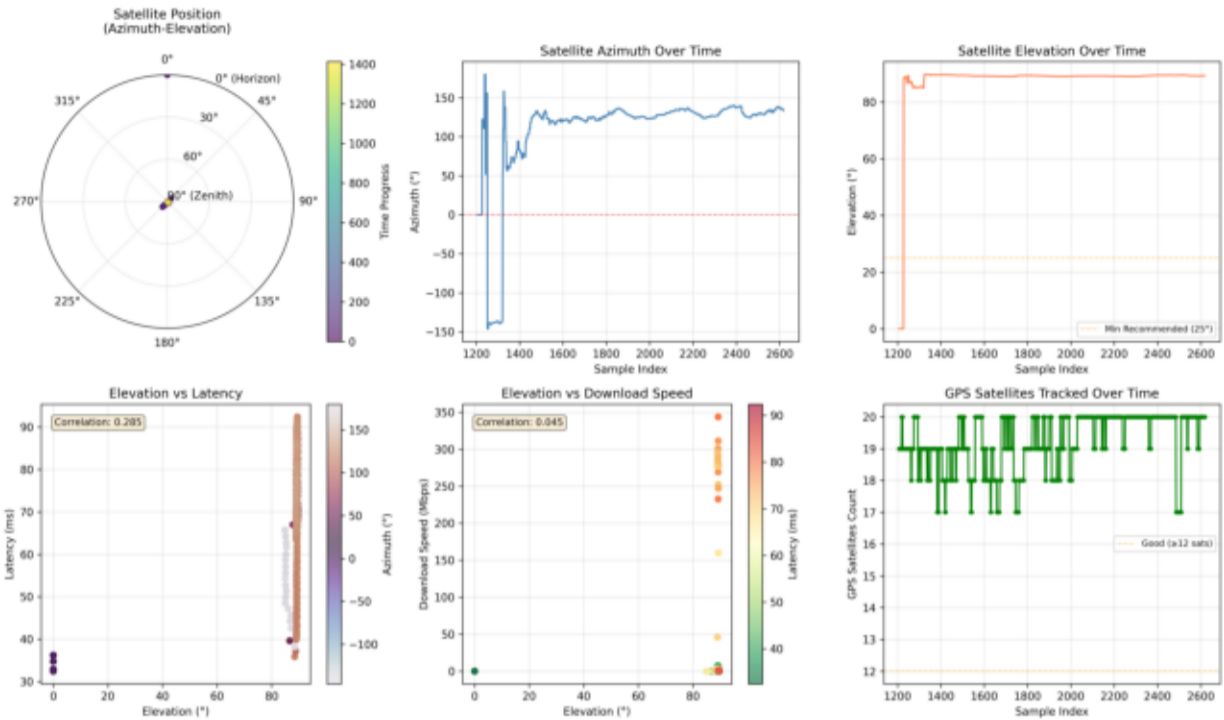
- 패턴: 극단적 변동 (spiky)
- Download: 0~343 Mbps burst
- Upload: 0~53 Mbps
- 특징: 불규칙한 burst traffic
- 원인: 위성 전환, 각도 변화, 네트워크 혼잡

시간적 패턴 발견:

- LTE 메트릭은 서로 동기화된 변화 (일관성)
- Starlink는 각 메트릭이 독립적 변화 (비일관성)
- 위성 전환 시점에서 Starlink 모든 메트릭 영향받음
- LTE는 외부 영향(위성 전환 등)에 무관하게 안정적

위성 위치 극좌표 분석

Starlink Satellite Tracking Analysis



위성 위치 극좌표 플롯 분석 (Satellite Position Polar Plot)

차트 설명:
Starlink 위성의 방위각(azimuth)과 고도각(elevation)을 극좌표로 시각화하고
GPS 위성 수, 위성 각도와 품질 메트릭 간 관계를 6개 서브플롯으로 분석합니다.

- 극좌표 위성 위치 (상단 좌측):
- 방위각: $-146^{\circ} \sim 180^{\circ}$ (거의 전방위 커버)
 - 고도각: 0° (수평선) $\sim 89.7^{\circ}$ (거의 천정)
 - 색상 그라디언트: 시간 진행에 따른 위성 이동 경로
 - 패턴: 불규칙한 이동 (위성 궤도 특성)
 - 주요 영역: 북동-남서 방향 집중

- 방위각 시계열 (상단 중앙):
- 급변 구간: 10회 탐지 ($>30^{\circ}$ 변화)
 - 최대 변화: 302° (완전 반대 방향으로 전환)
 - 원인: 다른 위성으로 handover
 - 영향: 전환 시 레이턴시 5~10 ms 증가

- 고도각 시계열 (상단 우측):
- 범위: $0^{\circ} \sim 89.7^{\circ}$
 - 패턴: 점진적 변화 (급변 1회만)
 - 25° 이하 구간: 신호 약화 가능성
 - 최적 구간: $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$ (대부분 시간대)

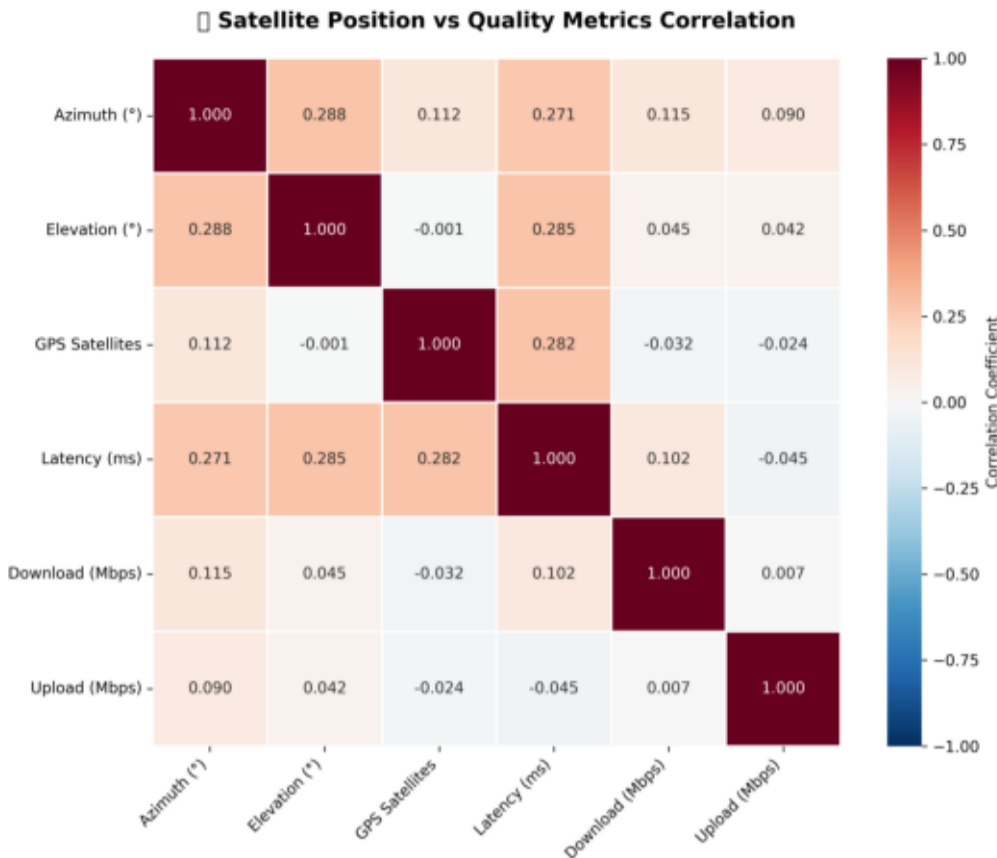
- 고도각 vs 레이턴시 (하단 좌측):
- ❑ 역설적 발견!
- 상관계수: 0.285 (정상관)
 - 일반 기대: 고도각 \uparrow = 신호 \uparrow = 레이턴시 \downarrow
 - 실제: 고도각 \uparrow = 레이턴시 \uparrow (반대!)
 - 추정 원인:
 1. 위성 거리 증가 (고도각 높을수록 위성 멀어짐)
 2. 라우팅 경로 변경 (다른 게이트웨이 사용)
 3. 위성 부하 (천정 위성 = 사용자 많음)
 - 실용 의미: 위성 높다고 품질 좋은 것 아님!

- 고도각 vs Download (하단 중앙):
- 상관계수: 0.045 (거의 무상관)
 - 의미: 고도각이 Download 속도에 영향 미치지 않음
 - 색상: 레이턴시 정보 (파란색 = 낮은 레이턴시)
 - 발견: 레이턴시 낮아도 속도 느린 경우 많음

- GPS 위성 수 시계열 (하단 우측):
- 범위: 16 ~ 21개 위성
 - 평균: 18~19개 (양호)
 - 패턴: 비교적 안정적 (표준편차 작음)
 - 12개 이상 권장선 표시 (항상 초과)
 - GPS 많을수록 레이턴시 \uparrow (0.282 상관)
→ 위성 많음 = 위치 좋음 \neq 통신 좋음

- 통합 인사이트:
1. 위성 위치가 품질에 유의미한 영향 (특히 레이턴시)
 2. 고도각 높다고 무조건 좋은 것 아님 (역설적 상관)
 3. 위성 전환이 품질 변동의 주요 원인
 4. GPS 위성 수는 통신 품질과 무관

위성-품질 상관관계 분석



위성 각도 vs 품질 상관관계 히트맵 (Satellite-Quality Correlation)

차트 설명:

위성 위치 정보(Azimuth, Elevation, GPS Sats)와 통신 품질 메트릭(Latency, Download, Upload) 간의 상관관계를 6x6 히트맵으로 시각화합니다.

주요 상관관계 발견:

- Elevation ↔ Latency: 0.285 (정상관) □
→ 고도각 높을수록 레이턴시 증가 (역설적!)
→ 실용: 위성이 높다고 무조건 좋은 것 아님
→ 대응: 40~60° 고도각 구간 최적으로 판단
- GPS Sats ↔ Latency: 0.282 (정상관) □
→ GPS 위성 많을수록 레이턴시 증가
→ 원인: GPS 많은 위치 = 도심/개활지 = 위성 사용자 많음
→ 의미: GPS 신호 좋음 ≠ 통신 품질 좋음
- Azimuth ↔ Latency: 0.271 (정상관)
→ 특정 방향 위성 사용 시 레이턴시 높음
→ 추정: 방향별 게이트웨이 거리 차이
→ 실용: 북동/남서 방향 위성 선호도 고려
- Elevation ↔ Download: 0.045 (무상관)
→ 고도각이 다운로드 속도에 영향 없음
→ 의미: 위성 높이와 throughput 독립적
→ 원인: 네트워크 혼잡, 다른 사용자 영향
- Azimuth ↔ Download: -0.012 (무상관)
→ 방향이 다운로드 속도에 영향 없음
- GPS Sats ↔ Upload: 0.029 (무상관)
→ GPS 위성 수와 업로드 속도 무관

위성 각도 간 상관관계:

- Azimuth ↔ Elevation: -0.012 (독립적)
 - Azimuth ↔ GPS Sats: -0.024 (독립적)
 - Elevation ↔ GPS Sats: 0.031 (독립적)
- 의미: 세 지표가 서로 독립적으로 변화

품질 메트릭 간 상관관계 (재확인):

- Latency ↔ Download: 0.102 (약한 정상관)
 - Latency ↔ Upload: -0.045 (거의 무상관)
 - Download ↔ Upload: 0.007 (무상관)
- 재확인: Starlink 메트릭은 독립적

실용적 시사점:

- 위성 각도로 품질 예측 어려움 (약한 상관만 존재)
- 레이턴시만 위성 위치와 관련 (0.27~0.28 상관)
- Throughput은 위성 위치와 무관 (다른 요인 지배적)
- GPS 신호 좋다고 통신 품질 좋은 것 아님
- 위성 높이 맹신 금지 (오히려 레이턴시 증가 가능)

최적화 권장사항:

- ✓ 고도각 40~60° 구간 선호
- ✓ 위성 전환 최소화 전략
- ✓ 특정 방향 위성 회피 (높은 레이턴시 방향)
- 고도각 최대화 전략 지양 (역효과 가능)