

북극항로 해상운송서비스의 통신복원전략 연구

차준훈¹

¹부산대학교 국제학부 학부생

ckwnsgms123@naver.com

A Study on the Communication Restoration Strategy of the Arctic Ocean Transit Service

JoonHeun Cha¹

¹Dept. of Global Studies, Pusan University

요 약

본 연구는 북극항로 해상통신 불안정으로 인한 해상운송서비스 활용 한계를 해결하기 위해, 북극 환경에 적합한 통신 전략을 연구한다. 기존 통신 다중화(Multiplexing/Redundancy) 방식은 채널 간 장애 상호 의존성으로 인해 통신 안정성 확보에 한계가 있는 반면, 통신 복원 전략(Communication Resilience)은 장애 발생 시 복원이 가능하다. 본 연구에서는 채널 상관관계수 ρ 를 포함한 통신 불확실성($E[\sigma]$) 수식을 설계하고, 복원계수 α , 데이터 전송률 r , 채널 장애 확률 $P_{out} \cdot P_{alt}$ 등을 조합한 256 가지 시나리오를 생성하면서 통신 복원 전략 평가 방식에 대해 논한다. 또한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 각 시나리오에서 통신 복원 전략이 보이는 효과를 분석 및 평가한다. 최종적으로 북극항로 내 해상운송서비스의 안정성 확보를 위한 통신 복원 전략의 필요성을 정량적으로 논한다.

1. 서론

최근 북극항로는 운송 시간 단축, 비용 절감 등 미래 해상물류 산업 및 국제 관계에서 핵심적인 역할을 수행할 차세대 해상운송 루트로 주목받고 있다. 그러나 북극항로 내 저궤도 위성망의 불안정성과 같은 요인으로 인한 통신 불안정성은 해상운송서비스의 안정성 및 신뢰성 확보에 중대한 제약으로 작용한다. 이러한 문제는 실시간 화물 추적, 실시간 화물 상태 모니터링, 화물운송 위험 사전 대응 체계 구축을 저해하여 북극항로 해상운송서비스의 활용을 제한한다.[1]

특히 기존의 북극항로 통신 전략 중 하나인 통신 다중화(Multiplexing / Redundancy) 방식은 부분적 장애 대응에 유용하지만, 통신 지연, 데이터 손실 등 복합적 불확실성을 근본적으로 해결하지 못한다. 반면, 통신 복원 전략(Communication Resilience)은 네트워크 장애를 동적으로 보정하여, 열악한 통신 인프라에서도 데이터 신뢰성과 해상운송서비스의 연속성을 보장할 수 있는 가능성을 가진다.[2]

이에 본 연구는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 다양한 통신 불확실성 시나리오를 설계 및 분석함으로써, 통신 복원 전략이 북극항로 해상운송서비스의 안정성 및 신뢰성 확보에 실질적으로 기여함을 실험적으로 검증하고자 한다.

2. 통신 복원 전략의 수식 설계 및 컨디션 설정

본 연구에서는 북극항로 내 해상통신의 불안정성을 정량적으로 분석하고, 기존의 단순 통신 다중화 방식의 한계를 보완하는 통신 복원 전략의 수식을 아래와 같이 설계하였다.

우선, 기본 통신 불확실성($E[\sigma]$)을 다음과 같이 정의한다.

$$E[\sigma] = \sigma_0 + \frac{r \cdot (1 - p_{out} \cdot p_{alt})}{\alpha \cdot k}$$

<수식 1> 기본 통신 불확실성($E[\sigma]$) 수식

여기서 각 변수의 의미는 1) σ_0 : 시스템 불확실성, 2) α : 복원계수, 3) k : 복구 지연 계수, 4) r : 데이터 정상 전송률, 5) P_{out} : 주 채널의 장애 확률, 6) P_{alt} : 보조 채널의 장애 확률이다.

그러나 주·보조 채널 간의 장애가 독립적으로 발생한다는 가정은 비현실적이다. 북극항로에서는 기상·우주환경적 요인에 따라 여러 채널이 동시에 영향을 받을 수 있다. 이러한 채널간 상호관계성을 상관관계수 ρ 를 도입함으로써 수식에 반영한다. 이에 따른 확장형 통신 불확실성($E[\sigma]$) 수식을 아래와 같이 제시한다.

$$E[\sigma] = \sigma_0 + \frac{r \cdot (1 - (P_{out}P_{alt} + \rho \sqrt{P_{out}(1-P_{out})P_{alt}(1-P_{alt}))})}{\alpha \cdot k}$$

<수식 2> 상관계수 ρ 반영된 통신 불확실성($E[\sigma]$) 수식

이러한 수식의 경계 조건(Boundary Condition) · 내부 조건(Inner Condition)을 순차적으로 아래에 제시한다.

1) 경계 조건: $P_{out}, P_{alt} \rightarrow 0$ 일 경우, $E[\sigma]$ 이 σ_0 에 도달한다. 즉, 완전한 정상상태에서는 시스템 불확실성이 초깃값 수준에 수렴한다. $P_{out}, P_{alt} \rightarrow 1$ 일 경우, 분모가 0에 가까워져 $E[\sigma]$ 는 발산한다. 즉, 모든 채널이 동시에 실패할 경우 복원 불가 상태임을 의미한다.

2) 내부 조건: $\rho \in [-1, 1]$ 로 설정한다. $\rho < 0$ 일 경우, 채널 간 보완성이 존재, 즉 주 채널이 통신 실패할 때, 보조 채널은 정상일 가능성이 높다. 즉 통신 불확실성($E[\sigma]$)이 감소한다. $\rho > 0$ 일 경우, 동시 장애 발생 가능성 증가하고, 통신 복원 전략의 필요성이 확대된다.

따라서 경계 조건은 극한 환경에서 모델이 물리적으로 타당하게 작동하는지 점검하고, 내부 조건은 현실적 운영 환경(상관성 존재 의미)을 반영해 통신 불확실성 수식($E[\sigma]$)의 확장성을 부여한다.

3. 본 연구 방식의 몬테카를로 시뮬레이션 채택 근거

본격적인 해당 연구의 증명에 앞서, 본 연구의 실험 방법으로 ‘몬테카를로 시뮬레이션(무작위 실험)’을 채택한 근거를 아래에 제시한다.

1) 북극항로 해상통신 환경은 기상·지리적 요인에 의해 확률적 변동성이 크다. 따라서 확률 기반 접근이 필수적이다. 이에 확률 분포에서 데이터 베이스를 반복 생성해 분포 전체를 추정할 수 있다. 또한 확률 기반 성과 지표 계산을 통해 시나리오별 분포 정보(신뢰구간·확률 정보)를 얻을 수 있다.

2) 불확실성 $E[\sigma]$ 은 업데이트 간격, 실패 확률 등 다양한 요인의 복합 비선형 작용으로 결정된다. 해당 연구 방식은 복잡한 상호작용을 수치화할 때 선형근사에 대한 의존성이 낮아 정밀한 연구가 가능하다.[3]

4. 시뮬레이션 데이터셋의 고정·변동값 설정 방식

다음으로 몬테카를로 시뮬레이션의 데이터셋 형성을 위한 고정값 및 변동값의 설정 방식과 그 근거를 아래에 제시한다.

먼저 몬테카를로 시뮬레이션에 활용될 수식의 α (복원계수), r (데이터 정상 전송률), P_{out} (주 채널 장애 확률), P_{alt} (보조 채널 장애 확률)에 각각 0.2, 0.4, 0.6, 0.8을 값으로 설정함으로써 총 $4^4=256$ 가지 시나리오를 수립하고, 상관계수는 $-0.9 \leq \rho \leq 0.9$ 구간에서 일정 간격으로 설정함으로써 데이터셋을 추출한다.

추가적으로, 여러 시나리오를 동일 기준으로 비교하기 위해 아래 값들을 기본(고정)값으로 설정한다.

1) 시뮬레이션 기간($T=100$ days), 2) 시간 단위(day), 3) 시스템 불확실성($\sigma_0=0.5$), 4) 통신 불확실성 증가율($k=0.2$), 5) 시뮬레이션 반복 수($N=1000$), 6) 업데이트 발생률($r=0.5$), 7) 주 채널 손실 확률 기본값($P_{out}=0.4$), 8) 목표 서비스 기준($\sigma_{target}=0.9$).

5. 몬테카를로 시뮬레이션 실험 및 연구 결과 분석

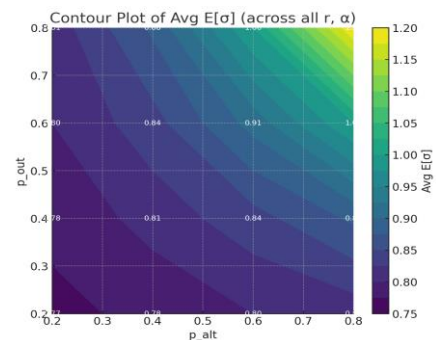
마지막으로, 위와 같이 설계된 몬테카를로 시뮬레이션을 기반으로 256 가지 시나리오별 통계적 검증을 수행함으로써 추출한 실험 데이터 및 연구 분석 결과를 아래에 제시한다.

1) 통신에 대한 P_{out}/P_{alt} 및 상관계수 ρ 의 영향 : 데이터 집계 결과, P_{out} 또는 P_{alt} 가 커질수록(통신 실패 확률 증가) $E[\sigma]$ 가 증가하는 경향이 나타난다. 또한 $P_{out} \cdot P_{alt}$ 의 영역에서 ρ 가 커질수록 $E[\sigma]$ 이 증가하면서 ρ 의 영향(기울기)은 비선형적으로 커지는 모습이 보인다.

이는 곧, 단순 병렬(다중화) 방식은 채널들이 독립이라는 전제에 의존하여, 공통 원인(태양폭풍·전리층 간섭 등)이 존재하면 동일한 원인으로 다수 채널이 동시에 약화됨을 뜻한다. 즉, 통신 다중화만으로는 북극항로 내 해상통신에 한계가 존재함을 증명한다.

2) α (복원계수)의 통신 단절 완충 효과 : 집계 결과, $\rho=0.5$, $p_{out}=0.6$, $p_{alt}=0.6$ 조건에서 $\alpha=0.2$ 일 때 평균 $E[\sigma] \approx 1.1$ 인것에 반해, $\alpha=0.8$ 일 경우 $E[\sigma] \approx 0.85$ 로 통신 안정화가 나타난다. 또한 α 가 커지면서 $E[\sigma]$ 이 감소하는 동시에 $E[\sigma] \leq 0.9$ 를 만족하는 시나리오 구간 비율이 증가하였다. 이에 256 개 시나리오 전 범위에서 α (복원계수)상승이 $E[\sigma]$ (통신 불확실성) 억제 효과를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

최종적으로, 본 연구 결과에 따라 북극항로 내 해상운송서비스의 안정성 및 신뢰성 확보를 위해 통신 복원 전략이 필수적임을 정략적으로 입증한다.



<그래프 1> 몬테카를로 시뮬레이션의 데이터 집계 결과

참고문헌

- [1] 홍성원, “북극항로의 상업적 이용 가능성에 관한 연구”, 국제지역연구, 제 13 권, 제 4 호, p. 557-561, 2010.
- [2] European Space Agency, “Arctic poses communications challenges”, ESA Publications, 2018.
- [3] Liu Y., Ma X., Qiao W., Ma L., Han B., “A novel methodology to model disruption propagation for resilient maritime transportation systems—a case study of the Arctic maritime transportation system”, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 241, Article No. 109620, 2024.

본 논문은 해양수산부 스마트 해운물류 융합인재 및 기업지원(스마트해운물류 x ICT 멘토링)을 통해 수행한 ICT 멘토링 프로젝트 결과물입니다.