

해상 Ad-hoc 네트워크를 위한 라우팅 경로 평가 및 선정 모델

진익철, 강희욱, 한승재, 이세림, *강세훈

주식회사 하버맥스 *한국전자통신연구원

(Jin, hwkang, tmdwo153, liselle)@harbormax.com *skang@etri.re.kr

Routing Path Evaluation and Selection Model for Maritime Ad-hoc Networks

Jin Ik Cheol, Kang Hee Wook, Han Seung Jae, Lee Se Rim, *Kang Sae Hoon

HarborMAX Co., Ltd. *ETRI

요약

본 논문은 해상 멀티-홉 통신 네트워크의 동적인 특성으로 인해 발생하는 라우팅 경로의 불안정성 문제를 해결하고자, 1단계 '필수 조건'을 통해 루프 발생 등 근본적 결함을 가진 경로를 사전 배제하고 2단계 '선택 조건'에서 흡 깊이, 지연 시간, 처리율 등 다각적인 지표를 정규화 및 가중 합산하여 경로의 품질을 정량적으로 평가함으로써 서비스 목적에 가장 부합하는 최적의 경로를 동적으로 선택하는 다단계 평가 모델을 제안하였다.

I. 서론

본 논문에서는 해상 멀티-홉(Multi-hop) 통신 네트워크 환경에서 최적의 라우팅 경로를 선정하기 위한 다단계 평가 모델을 제안한다. 해상 네트워크는 노드(선박)의 높은 이동성, 예측 불가능한 기상 변화로 인한 신호 감쇠, 제한된 대역폭 등 육상과는 다른 동적이고 가변적인 특성을 지닌다. 이러한 환경에서는 단일 지표만으로 경로의 우수성을 판단하기 어려우며, 안정적이고 효율적인 통신을 보장하기 위해서는 다각적인 요소를 고려하는 지능적인 경로 선정 메커니즘이 필수적이다.

제안하는 모델은 2단계 접근 방식을 채택한다. 먼저 '필수 조건(Hard Constraints)'을 통해 경로의 기본 유효성을 검증하여 부적합한 경로를 사전에 배제한다. 그 후 '선택 조건(Soft Constraints)'을 적용하여 유효한 후보 경로들의 지연 시간, 처리율, 안정성 등 다양한 품질 지표를 정량적으로 평가한다. 각 지표는 정규화(Normalization) 및 가중치 합산을 통해 최종 점수로 산출되며, 이를 통해 가장 우수한 경로를 동적으로 선택한다.



본 논문은 2025년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220544, 실해역 성능검증 기반기술 개발)

II. 본론

1단계: 필수 조건을 이용한 경로 유효성 검증 (Pass/Fail)

본 논문에서는 본격적인 품질 평가에 앞서, 제안된 경로가 통신 경로로서 기능할 수 있는지를 판별하는 과정은 네트워크의 안정성 확보에 있어 매우 중요하다. 아래 명시된 필수 조건 중 하나라도 충족하지 못하는 경로는 즉시 폐기(Fail)되며, 다음 단계인 점수화 과정에서 제외된다.

- **게이트웨이 유효성 (Gateway Reachability)** : 경로의 종착점인 육상 게이트웨이와의 논리적 연결성을 보장해야 한다. 주기적인 헬스체크(Health Check)를 통해 게이트웨이가 정상적으로 응답하는 경로만을 유효한 것으로 판단한다.

- **루프-프리 및 양방향성 (Loop-Free & Bidirectional Link)** : 데이터 패킷이 네트워크 내에서 무한히 순환하는 라우팅 루프(Loop)가 존재해서는 안 된다. 또한, 경로를 구성하는 모든 링크는 ETX(Expected Transmission Count) 값이 유한(finite)해야 하며, 이는 모든 링크가 양방향 통신이 가능함을 의미한다.

- **흡 수 제약 (Hop Count Limit)** : 과도한 흡 수는 종단 간 지연(End-to-End Latency)을 증가시키고 패킷 손실률을 높이는 주요 원인이 된다. 따라서 시스템의 목적(저지연, 일반 통신 등)에 따라 사전에 정의된 최대 흡 수(H_{\max})를 초과하는 경로는 배제한다.

$$H_{path} \leq H_{\max}$$

- **최소 링크 품질 (Minimum Link Quality)** : 안정적인 데이터 전송을 위해 경로를 구성하는 모든 개별 링크의 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)는 시스템에서 요구하는 최소 임계값(SNR_{\min}) 이상이어야 한다.

$$\forall link \in path, \ SNR_{link} \geq SNR_{\min}$$

- 경로 MTU 유효성 (Path MTU Validity) : 경로 MTU(Maximum Transmission Unit) 발견 과정에서 IP 단편화(IP Fragmentation)가 요구되는 경로는 통신 효율성과 안정성이 저하될 수 있으므로 배제한다.
- 보안 및 신뢰 정책 (Security and Trust Policy) : 네트워크에 참여하는 모든 노드는 사전에 허가된 목록(Whitelist)에 등록되어 있어야 하며, 규정된 수준의 암호화 및 인증 프로토콜을 준수해야 한다. 정책에 부합하지 않는 노드를 포함하는 경로는 보안상의 이유로 제외한다.

2단계: 선택 조건을 이용한 경로 품질 정량화 (Scoring)

1단계 유효성 검증을 통과한 후보 경로들을 대상으로, 다수의 품질 지표를 종합하여 최적의 경로를 선정한다. 각기 다른 단위와 스케일을 갖는 지표들을 일관성 있게 평가하기 위해 모든 지표를 0과 1 사이의 값으로 정규화(Normalization)하고, 각 지표의 중요도에 따라 가중치(ω)를 부여하여 합산함으로써 최종 경로 점수(Score)를 산출한다.

최종 경로 점수($Score_{path}$) 산출 공식은 다음과 같다.

$$Score_{path} = \sum_{i=1}^n (\omega_i \cdot N(P_i)), \text{ where } \sum \omega_i = 1$$

- ω_i : i 번째 평가 지표의 가중치
- $N(P_i)$: i 번째 평가 지표의 정규화된 값

각 세부 지표의 정규화 방식은 다음과 같다.

- 경로 깊이 (Hop Depth) : 흡 수가 적을수록 높은 점수를 받는다.

$$N(H) = \frac{H_{\max} - H_{path}}{H_{\max} - 1}$$

- 총 경로 손실 (Total Path ETX) : 경로 전체의 ETX 합($\sum ETX$)이 낮을수록 전송 효율이 높은 경로이다.

$$N(ETX) = 1 - \frac{\sum ETX_{path} - N_{link}}{\sum ETX_{\max} - N_{link}}$$

(N_{link} 는 경로의 링크 수, $\sum ETX_{\max}$ 는 ETX 합의 상한값)

- 종단 간 지연 (End-to-End Latency) : 평균 지연(L_{avg})과 95 백분위 수 지연(L_{95})을 함께 고려하여 지연 시간이 짧고 안정적일수록 높은 점수를 부여한다. L_{\max} 는 최대 허용 지연 시간이다.

$$N(L) = 1 - \frac{(\omega_{avg} \cdot L_{avg}) + (\omega_{95} \cdot L_{95})}{L_{\max}}$$

- 병목 처리율 (Bottleneck Throughput) : 경로상에서 가장 낮은 대역폭(T_{low})이 전체 경로의 성능을 결정하므로, 이 값이 클수록 높은 점수를 받는다.

$$N(T) = \frac{T_{low} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$

- 게이트웨이 백본 용량 (Gateway Backbone Capacity) : 해안 기지국이 보유한 인터넷 백본의 용량(T_{GW})이 클수록 고품질의 서비스가 가능하므로 이를 점수에 반영한다.

$$N(GW) = \frac{T_{GW}}{T_{GW\max}}$$

이와 같은 다단계 평가 모델을 통해, 해상 멀티-홉 네트워크의 복잡하고 동적인 환경 속에서도 각 경로의 유효성과 통신 품질을 종합적이고 체계적으로 판단할 수 있다. 최종 산출된 점수가 가장 높은 경로를 최적 라우팅 경로로 채택함으로써, 전체 네트워크의 성능과 안정성을 극대화할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 제안된 모델을 통해, 복잡하고 가변적인 해상 환경 속에서도 각 경로의 품질을 객관적인 점수로 비교하고 우선순위를 결정하는 것이 가능해졌다. 운영자는 서비스의 특성(예: 실시간 영상 전송, 대용량 데이터 다운로드)에 맞춰 각 평가지표의 가중치를 조절함으로써, 상황에 맞는 최적의 경로를 유연하게 선택할 수 있다.

하지만 본 연구는 다음과 같은 한계점을 지니며, 이는 향후 연구를 통해 보완될 필요가 있다. 첫째, 본 논문에서 제시한 평가 지표 외에도 선박의 예상 이동 경로, 속도, 에너지 효율성 등과 같은 모빌리티 요소를 경로 선정에 통합한다면 더욱 정교한 판단이 가능할 것이다. 둘째, 모든 노드에서 각종 품질 지표가 실시간으로 정확하게 측정된다고 가정하였으나, 실제 환경에서 발생할 수 있는 측정 지연이나 오차가 라우팅 결정에 미치는 영향에 대한 심층적인 분석이 요구된다.

따라서 향후 연구 과제로는 AI 머신러닝(Machine Learning)을 도입하여 과거의 통신 데이터를 학습하고 미래의 링크 상태를 예측함으로써, 현재 상태뿐만 아니라 미래의 변화까지 고려하는 예측 기반의 라우팅 알고리즘을 개발하는 방향을 제안한다.

참 고 문 헌

- [1] De Couto, D. S., Aguayo, D., Bicket, J., & Morris, R. (2003). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom).
- [2] Draves, R., Padhye, J., & Zill, B. (2004). Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom).
- [3] Salah, H. A., & Agrawala, A. (2016). A Survey of Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks.
- [4] Hu, Y. C., Perrig, A., & Johnson, D. B. (2005). Ariadne: a secure on-demand routing protocol for ad hoc networks. Wireless Networks, 11(1), 21-38.