



Received: 2026/08/21
Revised: 2026/09/02
Accepted: 2026/09/15
Published: 2026/09/30

*Corresponding Author:

Chul Hyun

333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea

Tel: +82-31-5178-4293

Fax: +82-31-5179-7086

E-mail: chul.hyun@gmail.com

AUV 운용 디지털 트윈의 저대역 상태 동기화를 위한 정보수준별 텔레메트리 구조

Information-Level Telemetry Structure for Low-Bandwidth State Synchronization of AUV Operational Digital Twins

현철^{1*}, 김현승², 이성균¹, 전우중²

¹LIG디펜스&에어로스페이스 M&S팀 수석연구원

²LIG디펜스&에어로스페이스 M&S팀 선임연구원

Chul Hyun^{1*}, Hyunseung Kim², Sungkyun Lee¹, Woojoong Jeon²

¹Principal researcher, M&S Team, LIG Defense&Aerospace

²Senior researcher, M&S Team, LIG Defense&Aerospace

Abstract

본 논문은 수중 저대역 통신 환경에서 AUV 운용 디지털 트윈의 상태 동기화를 위한 정보수준별 텔레메트리 구조를 제안한다. AUV 정보전달 문제를 원시 데이터 복제가 아닌 핵심 상태정보 동기화 문제로 정의하고, 전송 정보를 기본 상태정보, 상태 신뢰도 정보, 동적 맥락 정보, 이벤트 정보로 구분하였다. 이를 바탕으로 Level 0부터 Level 3까지의 텔레메트리 구조를 제시하였다. Payload 기준 분석 결과, 원시 데이터 참조값은 약 22.464 kbps인 반면 Level 2 구조는 약 0.512 kbps로 산정되어 약 97.72%의 전송량 절감 가능성을 보였다. 또한 DVL 유실 예시를 통해 이벤트 기반 보조 전송이 원격 디지털 트윈의 상태 저하 인지 지연을 줄일 수 있음을 보였다. 제안 구조는 제한된 수중 통신 환경에서 AUV 운용 디지털 트윈 구현을 위한 기초 텔레메트리 설계 기준으로 활용될 수 있다.

This paper proposes an information-level telemetry structure for synchronizing the states of autonomous underwater vehicle (AUV) operational digital twins under low-bandwidth underwater communication. The problem is formulated as essential-state synchronization rather than raw-data replication, and telemetry information is classified into basic state, state confidence, dynamic context, and event information. Based on this classification, four telemetry levels, from Level 0 to Level 3, are defined. Payload-based analysis shows that the reference raw-data stream requires approximately 22.464 kbps, whereas the proposed Level 2 structure requires approximately 0.512 kbps, corresponding to a 97.72% reduction in payload. A DVL outage example further shows that event-based auxiliary transmission can reduce the confidence awareness delay of the remote digital twin. The proposed structure provides a basic telemetry design framework for AUV operational digital twins operating in constrained underwater communication environments.

Keywords

자율무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle), 디지털 트윈(Digital Twin), 상태 동기화(State Synchronization), 텔레메트리(Telemetry), 상태 신뢰도(State Confidence)

1. 서론

자율무인잠수정(autonomous underwater vehicle, AUV)은 해양 탐사, 해저 조사, 감시정찰, 기뢰 탐색 등 다양한 임무에서 활용되고 있다. AUV는 운용자의 직접 조종 없이 사전에 설정된 임무를 수행할 수 있다는 장점을 가지지만, 수중 환경에서는 전파 기반 통신과 GNSS 사용이 제한되므로 항법, 상태 감시, 원격 운용지원 측면에서 고유한 제약을 가진다. 특히 AUV 항법은 dead reckoning, signal-based navigation, map-matching, integrated navigation 등 다양한 방식으로 연구되어 왔으나, 복잡한 수중 환경과 센서 성능 저하로 인해 여전히 중요한 기술적 과제로 남아 있다[1].

AUV와 수상 또는 지상 운용체계 사이의 정보교환은 주로 수중 음향통신에 의존한다. 그러나 수중 음향통신은 낮은 전송률, 큰 지연, 채널 변동성, 간헐적 연결성과 같은 제약을 가지므로, AUV 내부에서 생성되는 고주기 원시 데이터를 모두 원격 시스템에 전송하는 방식은 현실적으로 적용하기 어렵다[2]. 이로 인해 AUV 운용 중 원격 시스템이 물리 AUV의 상태를 충분히 파악하고, 가상 모델을 운용 상태와 동기화하는 것은 일반적인 육상 또는 공중 무인체계보다 더 어려운 문제가 된다.

최근에는 통신과 항법 제약이 큰 수중 운용 환경에서도 원격 운용지원, 상태 예측, 상황인식 향상을 도모하기 위해 수중 무인체계 디지털 트윈(digital twin, DT) 연구가 점차 제안되고 있다. 수중 ROV 원격조작 분야에서는 가상환경, mapping, localization, path planning, simulation 기능을 통합하여 운용자의 상황인식과 조작 지원을 향상시키는 underwater DT 구조가 연구되었다[3]. 또한 통신이 제한되거나 두절될 수 있는 환경에서 UUV의 motion prediction과 autonomous decision support를 지원하기 위한 DT 시스템이 제안되었으며[4], AUV 군집 운용에서는 각 AUV의 동역학과 환경 정보를 반영한 digital replica를 활용하여 수중 상황인식과 예측 성능을 향상시키고, 군집 제어를 지원하는 접근도 보고되었다[5]. 이러한 연구들은 수중 무인체계 운용에서 DT가 teleoperation, motion prediction, swarm control, monitoring, testing 등 다양한 기능을 지원할 수 있음을 보여준다.

그러나 기존 수중 DT 연구는 주로 DT 시스템 구조, 가상환경 구성, 예측 모델, 제어 응용 또는 시험 플랫폼에 초점을 두고 있다. 반면, 실제 수중 저대역 통신 환경에서 물리 AUV의 어떤 정보를 원격 DT에 어떤 수준으로 전달해야 하는지에 대한 텔레메트리 구조는 상대적으로 명확히 다루어지지 않았다. 기존 연구에서도 AUV 운용을 위한 경량 디지털 트윈 프레임워크가 제안되었으나, 이는 AUV 운용에서 DT 적용 가능성과 경량화 필요성을 제시하는 개념적 프레임워크에 가까웠다[6]. 따라서 경량 DT를 실제 저대역 통신 환경에서 운용하기 위해서는 원격 DT의 상태 갱신과 해석에 필요한 정보 항목을 구체적으로 구조화할 필요가 있다.

본 연구는 이 문제를 원시 데이터 복제(raw-data replication) 문제가 아니라 핵심 상태정보 동기화(essential-state synchronization) 문제로 정의한다. 원격 DT가 필요로 하는 것은 모든 센서 원시값의 복제가 아니라, 물리 AUV의 운용 상태를 유지하고 해석하는 데 필요한 핵심 정보이다. 특히 상태값만 전송하는 방식에는 한계가 있다. 동일한 위치 추정값이라 하더라도 DVL 보정이 정상적으로 이루어진 경우와 DVL 유실 이후 관성항법만으로 전파된 경우는 신뢰도 측면에서 서로 다른 의미를 가진다. SINS/DVL 통합항법 연구에서도 데이터 융합, 보정, DVL 데이

터 유실 처리가 수중 고정밀 항법의 핵심 기술로 논의되고 있으며[7], AUV 위치 텔레메트리 압축 연구에서도 저대역 음향 링크에서 전송 정보를 줄이기 위한 상태 관측 기반 접근이 제안된 바 있다[8]. 따라서 AUV 운용 DT에서는 상태값뿐 아니라 상태 신뢰도, 센서 가용성, 상태 예측에 필요한 동적 맥락, 그리고 상태 급변을 알리는 이벤트 정보를 함께 고려할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 수중 저대역 통신 환경에서 AUV 운용 DT의 상태 동기화를 위한 정보수준별 텔레메트리 구조를 제안한다. 제안 구조는 원격 DT의 기능을 기준으로 전송 정보를 기본 상태정보, 상태 신뢰도 정보, 동적 맥락 정보, 이벤트 정보로 구분하고, 이를 Level 0부터 Level 3까지 단계적으로 구성한다. 또한 payload 기준 전송량 산정과 DVL 유실 상황의 시간축 예시를 통해, 제안 구조가 제한된 수중 통신 환경에서 원격 DT의 상태 갱신과 상태 해석을 지원할 수 있음을 검토한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수중 저대역 환경에서 AUV 운용 DT의 상태 동기화 문제를 정의한다. 3장에서는 핵심 상태정보를 계층화하고, 정보수준별 텔레메트리 구조를 제안한다. 4장에서는 payload 기준 전송량 분석과 DVL 유실 상황 예시를 통해 제안 구조의 적용 가능성을 검토한다. 마지막으로 5장에서 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 수중 저대역 환경에서의 AUV DT 상태 동기화 문제

2.1 상태 동기화 관점의 AUV 운용 DT

AUV 운용 디지털 트윈은 물리 AUV의 모든 내부 신호를 원격에서 그대로 재현하는 것이 아니라, 제한된 통신 조건에서 원격 모델이 AUV의 주요 운용 상태를 유지하고 해석할 수 있도록 하는 데 목적이 있다. 따라서 본 연구에서 다루는 AUV 운용 DT의 핵심은 원시 데이터 복제가 아니라, 원격 DT에 필요한 핵심 상태정보를 선별하여 동기화하는 것이다.

원격 DT가 운용상 의미 있는 상태를 유지하기 위해서는 단순한 위치 및 자세 정보만으로는 충분하지 않다. 현재 상태를 갱신하기 위한 기본 상태값, 해당 상태값을 어느 정도 신뢰할 수 있는지 판단하기 위한

신뢰도 정보, 패킷 수신 간격 사이의 상태 예측을 위한 동적 맥락 정보가 함께 필요하다. 또한 DVL 유실, 항법 품질 저하, 구동기 포화화 같은 주요 상태 변화는 정기 전송 주기와 무관하게 조기에 전달될 필요가 있다.

2.2 원시 데이터 중심 접근의 한계

AUV 내부에서는 IMU, DVL, 심도계, 추진기, 제어타, 전원계, 임무관리장치 등 다양한 데이터가 생성된다. 원격 DT가 이러한 데이터를 모두 수신할 수 있다면 물리 AUV의 상태를 정밀하게 반영할 수 있지만, 수중 음향통신은 낮은 전송률, 지연, 채널 변동성, 간헐적 연결성 등의 제약을 가지므로 고주기 원시 데이터를 지속적으로 전송하기 어렵다[2].

특히 IMU와 같은 고주기 센서 데이터는 단독으로도 큰 전송량을 요구하며, 여기에 DVL, 심도계, 추진기, 제어타 및 시스템 상태 정보를 포함하면 기본 운용 데이터만으로도 수중 저대역 통신 환경에 부담이 된다. 실제 운용에서는 다운샘플링, 항목 생략, 온보드 요약이 불가피하다. 따라서 중요한 문제는 데이터를 단순히 줄이는 것이 아니라, 원격 DT의 상태 갱신과 해석에 필요한 정보를 어떤 기준으로 남길 것인가이다. 수중 저대역 통신 환경에서 AUV 디지털 트윈의 핵심은 모든 원시 데이터를 원격 시스템으로 복제하는 것이 아니라, 상태 동기화에 필요한 핵심 정보를 기능적으로 정제하여 전송하는 데 있다.

2.3 핵심 상태정보 패킷의 정의

본 연구에서는 AUV에서 원격 DT로 전송되는 동기화용 정보 단위를 핵심 상태정보 패킷으로 정의한다. 이 패킷은 상태값만을 포함하는 것이 아니라, 원격 DT가 상태를 갱신하고, 수신 상태의 신뢰도를 해석하며, 패킷 사이의 상태를 예측하고, 주요 이벤트를 인지하는 데 필요한 정보를 포함한다.

핵심 상태정보 패킷의 구성은 식 (1)과 같다.

$$T_k = [x_{s,k}, c_k, u_{d,k}, e_k] \quad (1)$$

여기서 T_k 는 k 번째 전송 시점의 DT 동기화용 텔레메트리 패킷을 의미한다. $x_{s,k}$ 는 위치, 속도, 자세, 심도

등 기본 상태정보를 나타낸다. c_k 는 항법 신뢰도, 센서 가용성, DVL 유효성, 보정 이후 경과시간 등 상태 해석에 필요한 신뢰도 정보를 의미한다. $u_{d,k}$ 는 추진기, 제어타, 침로 변화, 속도 변화 등 패킷 수신 간격 사이의 상태 예측에 필요한 동적 맥락 정보를 나타낸다. e_k 는 DVL 유실, 항법 신뢰도 급락, 구동기 포화, fault 발생 등 이벤트 기반 보조 정보를 의미한다.

식 (1)은 제안 구조가 단순한 상태값 전송이 아니라, 원격 DT의 상태 갱신, 신뢰도 해석, 상태 예측, 이벤트 인지를 함께 고려하는 정보 구조임을 나타낸다.

2.4 상태값과 신뢰도 정보의 분리

AUV 항법에서는 수중에서 GNSS 사용이 제한되므로 SINS/DVL 통합항법이 널리 활용된다. 이때 DVL은 관성항법 오차 누적을 제한하는 중요한 보정 정보를 제공하지만, 해저 고도, 지형, 센서 품질 등에 따라 측정 유실 또는 품질 저하가 발생할 수 있다. 관련 연구에서도 데이터 융합, 보정, DVL 데이터 유실 처리는 수중 고정밀 통합항법의 핵심 기술로 논의되고 있다[7].

따라서 원격 DT는 상태 추정값 자체뿐 아니라 그 상태가 산출된 항법 조건도 함께 알아야 한다. 예를 들어 동일한 위치값이 전송되더라도, 해당 값이 DVL 보정이 정상적으로 반영된 결과인지, DVL 유실 이후 관성항법 전파에 의존한 결과인지에 따라 운용상의 의미는 달라진다. 전자는 비교적 신뢰 가능한 상태로 해석될 수 있지만, 후자는 위치값이 계속 갱신되더라도 실제 오차가 증가하고 있을 가능성을 함께 고려해야 한다.

이러한 이유로 본 연구에서는 상태값과 상태 신뢰도 정보를 분리하여 다룬다. 상태값은 원격 DT의 가상 AUV를 갱신하기 위한 수치 정보이고, 신뢰도 정보는 해당 상태값을 어떤 수준으로 해석해야 하는지를 나타내는 의미 정보이다.

2.5 텔레메트리 구조 설계 요구사항

앞선 논의를 바탕으로, 수중 저대역 통신 환경에서 AUV 운용 DT를 위한 텔레메트리 구조는 다음 요구사항을 만족해야 한다.

첫째, 제한된 통신량 안에서 기본 상태 동기화를 유

지해야 한다. 둘째, 상태값의 신뢰도와 센서 가용성 정보를 함께 제공해야 한다. 셋째, 패킷 수신 간격 사이의 상태 예측을 위해 최소한의 동적 맥락 정보를 포함해야 한다. 넷째, DVL 유실, 항법 품질 저하, 구동기 포화와 같은 주요 이벤트는 정기 패킷 주기와 무관하게 조기에 전달될 수 있어야 한다.

따라서 AUV 운용 DT의 텔레메트리는 고정된 단일 패킷 구조보다, 포함 정보의 수준에 따라 단계적으로 확장되는 구조가 적합하다. 다음 장에서는 상태정보, 신뢰도 정보, 동적 맥락 정보, 이벤트 정보의 포함 여부에 따라 정보수준별 텔레메트리 구조를 제안한다.

3. 정보수준별 텔레메트리 구조

3.1 핵심 상태정보의 기능적 계층화

수중 저대역 통신 환경에서 AUV 운용 DT를 유지하기 위해서는 AUV 내부에서 생성되는 모든 데이터를 동일한 수준으로 전송할 수 없다. 원격 DT가 필요로 하는 정보는 단순 상태 표시, 상태 신뢰도 해석, 패킷 사이 상태 예측, 주요 이벤트 인지와 같이 서로 다른 기능을 가진다. 따라서 본 연구에서는 AUV 운용 DT를 위한 핵심 상태정보를 센서 종류가 아니라 원격 DT의 기능을 기준으로 계층화한다.

Table 1은 본 연구에서 고려하는 텔레메트리 정보를 기능적 역할에 따라 정리한 것이다. 기본 상태정보는 가상 AUV의 위치와 자세를 갱신하기 위한 정보이고, 상태 신뢰도 정보는 수신된 상태값의 신뢰도를 해석하기 위한 정보이다. 동적 맥락 정보는 정기 패킷 사이에서 원격 DT가 상태를 예측하는 데 활용되며, 이

Table 1. Functional layers of telemetry information for AUV operational DT

Layer	Description
Basic state	Position, velocity, attitude, depth, and heading for updating the virtual AUV state.
State confidence	DVL validity, sensor availability, navigation quality, and elapsed time since the last correction.
Dynamic context	Summarized thruster, control-surface, heading-rate, and speed-change information for short-term prediction.
Event	DVL outage, confidence degradation, actuator saturation, or fault occurrence for early awareness.

벤트 정보는 DVL 유실, 구동기 포화, fault 발생과 같은 주요 상태 변화를 조기에 인지하기 위한 정보이다.

이러한 구분은 원시 데이터의 단순 축약과 다르다. 예를 들어 DVL의 원시 측정값 전체를 전송하지 않더라도, DVL 유효성, 마지막 보정 이후 경과시간, 항법 품질 정보는 원격 DT가 현재 위치값의 신뢰도를 해석하는 데 활용될 수 있다. 따라서 제안 구조는 센서 출력 중심의 데이터 선택이 아니라, 원격 DT 기능 중심의 정보 선택 방식이다.

3.2 정보수준별 텔레메트리 구성

Table 1의 정보 계층을 바탕으로, 본 연구에서는 AUV 운용 DT의 텔레메트리 구조를 Level 0부터 Level 3까지 네 단계로 구분한다. 각 수준은 포함되는 정보의 범위와 원격 DT가 수행할 수 있는 기능에 따라 정의된다.

Table 2. Proposed information-level telemetry structure

Level	Information and function
Level 0	Basic state only. It supports position and attitude update, but does not provide confidence interpretation.
Level 1	Basic state + state confidence. It allows the remote DT to interpret the reliability of the received state.
Level 2	Level 1 + dynamic context. It improves short-term prediction between telemetry packets.
Level 3	Level 2 + event packet. It supports early awareness of DVL outage, confidence degradation, or system faults.

Level 0은 기본 상태값만 전송하는 최소 구성이다. 이 수준에서는 원격 DT가 AUV의 위치와 자세를 갱신할 수는 있지만, 수신된 상태값이 정상 항법 조건에서 산출된 것인지 또는 센서 유실 이후 오차가 증가하고 있는 상태인지는 판단하기 어렵다.

Level 1은 상태값에 신뢰도 정보를 추가한 구성이다. DVL 유효성, 센서 가용성, 항법 품질, 보정 이후 경과시간 등을 함께 전송함으로써 원격 DT가 수신 상태값의 운용상 의미를 해석할 수 있도록 한다.

Level 2는 Level 1에 동적 맥락 정보를 추가한 구성이다. 추진기, 제어타, 침로 변화, 속도 변화와 같은 요약 정보는 패킷 수신 간격 사이에서 가상 AUV의 상태

를 예측하는 데 활용될 수 있다.

Level 3는 Level 2의 정기 패킷에 이벤트 기반 보조 패킷을 결합한 구성이다. DVL 유실, 항법 신뢰도 급락, 구동기 포화와 같이 운용상 중요한 상태 변화가 발생하면 정기 패킷 주기를 기다리지 않고 이벤트 패킷을 전송한다. 이를 통해 원격 DT는 상태 저하를 더 빠르게 인지할 수 있다.

3.3 정기 패킷과 이벤트 패킷의 결합

제안한 텔레메트리 구조는 정기 패킷과 이벤트 패킷의 결합을 전제로 한다. 정기 패킷은 원격 DT의 기본 상태 동기화를 유지하기 위해 일정 주기로 전송된다. Level 0부터 Level 2까지는 정기 패킷에 포함되는 정보 범위를 단계적으로 확장한 구조로 볼 수 있다.

반면 이벤트 패킷은 정기 패킷 사이에 주요 상태 변화가 발생했을 때 전송되는 보조 패킷이다. 모든 정보를 높은 주기로 계속 전송하기 어렵기 때문에, 정상 상태에서는 정기 패킷 중심으로 운용하고, 상태 해석에 중요한 변화가 발생했을 때만 이벤트 패킷을 추가하는 방식이 저대역 수중통신 환경에 적합하다.

Table 3. Periodic and event packet operation

Packet type	Operation
Periodic packet	Transmitted at a fixed interval for state update, confidence interpretation, and short-term prediction.
Event packet	Transmitted when DVL outage, confidence degradation, actuator saturation, or fault occurrence is detected.

이벤트 패킷은 평균 전송량을 크게 증가시키지 않으면서도 원격 DT의 상태 해석 지연을 줄이는 데 목적이 있다. 본 연구에서는 대표적인 이벤트 조건으로 DVL 유효성 flag가 일정 시간 이상 false로 유지되는 경우, 항법 품질등급이 하락하는 경우, 마지막 유효 보정 이후 경과시간이 기준을 초과하는 경우, 제어타 또는 추진기 포화 flag가 발생하는 경우, 시스템 fault flag가 새롭게 발생하는 경우를 고려한다.

본 논문의 DVL 유실 예시에서는 DVL invalid 상태가 1초 이상 지속되는 경우를 이벤트 발생 조건으로 가정한다. 이 기준은 특정 시스템에 고정된 값이 아니라, 이벤트 기반 보조 전송의 효과를 설명하기 위한

예시 조건이다. 실제 적용에서는 AUV의 항법 필터 구조, 센서 출력 주기, 통신 지연, 임무 위험도에 따라 이벤트 판단 기준을 조정할 수 있다.

3.4 제안 구조의 특징

제안한 정보수준별 텔레메트리 구조의 특징은 세 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 원격 DT 기능 중심의 정보 선택 구조이다. 제안 구조는 센서가 무엇을 출력하는가보다 원격 DT가 어떤 기능을 수행해야 하는가를 기준으로 정보를 구분한다. 기본 상태정보는 상태 갱신에, 상태 신뢰도 정보는 상태 해석에, 동적 맥락 정보는 단기 예측에, 이벤트 정보는 주요 상태 변화 인지에 대응한다.

둘째, 상태값과 신뢰도 정보를 분리한다. 상태값만으로는 원격 DT가 AUV의 위치와 자세를 표시할 수는 있지만, 그 상태의 신뢰도까지 해석하기 어렵다. 상태 신뢰도 정보를 별도로 포함하면 DVL 유실, 센서 품질 저하, 보정 중단과 같은 상황에서 현재 가상 상태의 운용상 의미를 함께 표현할 수 있다.

셋째, 정기 전송과 이벤트 전송을 결합한다. 정기 패킷은 기본 상태 동기화를 유지하고, 이벤트 패킷은 DVL 유실이나 항법 신뢰도 저하와 같은 상태 변화를 조기에 반영한다. 이를 통해 제한된 수중 통신 환경에서도 평균 전송량과 상태 해석 지연 사이의 균형을 확보할 수 있다.

따라서 제안 구조는 단순 데이터 축약 방식이 아니라, 저대역 수중통신 환경에서 AUV 운용 DT의 상태 갱신, 신뢰도 해석, 단기 예측, 이벤트 인지를 지원하기 위한 정보전달 구조로 볼 수 있다. 다음 장에서는 제안 구조의 payload 전송량을 산정하고, DVL 유실 상황을 예로 들어 정보수준별 텔레메트리 구조의 효과를 검토한다.

4. 전송량분석 및 DVL 유실 상황 적용 예시

4.1 분석 개요

본 장에서는 제안한 정보수준별 텔레메트리 구조의 적용 가능성을 검토하기 위해 payload 기준 전송량 산정과 DVL 유실 상황 예시를 제시한다. 분석의 목적은 특정 AUV 또는 특정 수중 음향통신 장비의 세

부 프로토콜을 모사하는 것이 아니라, 원시 데이터 중심 접근과 핵심 상태정보 중심 접근의 전송량 차이와 상태 해석 차이를 예시적으로 보이는 데 있다.

본 연구에서 사용하는 원시 데이터 스트림은 실제 수중 운용에서 반드시 그대로 전송되는 기준 방식이 아니라, 물리 AUV의 센서 및 시스템 데이터를 원격 DT에 직접 반영한다고 가정할 때 요구될 수 있는 payload 규모를 나타내는 참조값이다. 실제 운용에서는 통신 제약으로 인해 다운샘플링, 항목 생략, 온도 보드 요약이 불가피하므로, 중요한 문제는 데이터를 단순히 줄이는 것이 아니라 원격 DT의 기능을 유지하기 위해 어떤 정보를 남길 것인가이다.

본 장의 전송량 산정에서는 패킷 헤더, 오류정정 부호, 재전송, 암호화, 프로토콜 오버헤드 등은 제외하고 payload만 고려하였다. 또한 본 연구에서 사용한 raw-data stream, 1 Hz 정기 전송, Level별 패킷 크기 및 이벤트 수신 조건은 특정 AUV나 수중 음향통신 장비비를 대표하는 값이 아니라, 정보수준별 텔레메트리 구조의 영향을 비교하기 위한 예시 조건이다. Payload 기준 평균 전송률은 식 (2)와 같이 계산한다.

$$R = 8Bf \quad (2)$$

여기서 R 은 payload 기준 평균 전송률을 의미한다. B 는 1회 전송되는 패킷 크기를 byte 단위로 나타낸 값이며, f 는 패킷 전송 주파수를 Hz 단위로 나타낸 값이다.

4.2 원시 데이터 스트림의 전송량 참조값

원시 데이터 중심 접근에서는 AUV 내부에서 생성되는 대표 센서 및 시스템 상태 데이터를 가능한 한 직접 전송한다고 가정할 수 있다. 본 연구에서는 기본 운용 상태 감시에 필요한 항목으로 IMU, DVL, 심도계, 제어타, 추진기, 시스템 상태 정보를 고려하였다. 각 항목의 payload 전송량 참조값은 Table 4와 같다.

Table 4에서 볼 수 있듯이 영상, 소나, 고해상도 환경정보와 같은 대용량 데이터를 제외하더라도 기본 센서 및 시스템 상태 원시 데이터만으로 약 22.5 kbps의 payload가 요구된다. 특히 IMU 데이터가 전체 전송량의 대부분을 차지한다. 그러나 원격 DT가 운용 상태를 유지하기 위해 항상 고주기 IMU 원시값

Table 4. Reference payload rate of raw-data streams

Raw-data stream	Payload rate
IMU, 6-axis, 32 bit, 100 Hz	19.200 kbps
DVL, 6 items, 32 bit, 5 Hz	0.960 kbps
Depth, 1 item, 32 bit, 10 Hz	0.320 kbps
Control surface, 8 items, 16 bit, 10 Hz	1.280 kbps
Thruster, 4 items, 16 bit, 10 Hz	0.640 kbps
System status, 64 bit, 1 Hz	0.064 kbps
Total	22.464 kbps

자체를 필요로 하는 것은 아니다. 많은 경우 필요한 것은 온도 항법장치에서 처리된 상태 추정값, 해당 상태의 신뢰도, 센서 가용성, 상태 예측에 필요한 요약 정보이다.

따라서 Table 4는 실제로 적용해야 할 전송 방식이라기보다, 원시 데이터 복제 관점에서 요구될 수 있는 전송량 규모를 보여주는 참조 기준으로 해석하는 것이 적절하다. 실제 수중 운용에서는 기존의 축약형 상태 메시지나 임무 상태 패킷과 같이 제한된 정보만 전송하는 방식이 사용될 수 있으며, 본 연구는 이러한 축약 정보를 원격 DT의 기능 관점에서 상태값, 신뢰도, 동적 맥락, 이벤트 정보로 재구성하는 데 초점을 둔다.

4.3 정보수준별 패킷 구성 및 전송량 비교

제안 구조에서는 원시 센서 데이터를 직접 전송하지 않고, 원격 DT의 상태 동기화에 필요한 핵심 상태 정보를 패킷 형태로 전송한다. 본 연구에서는 정기 패킷이 1 Hz로 전송된다고 가정하고, Level 3의 경우 이벤트 발생 시 16 byte 보조 패킷이 추가되는 것으로 설정하였다. Level별 payload 크기는 시간/식별자, 기본 상태값, 신뢰도 flag, 동적 맥락 요약값 등을 16 bit 또는 32 bit 단위로 양자화하여 구성할 수 있다는 가정에 기반한 예시값이며, 특정 시스템에 고정된 패킷 규격을 의미하지 않는다. 정보수준별 패킷 구성과 전송량 예시는 Table 5와 같다.

Table 5에서 Level 0은 상태값만 포함하는 최소 구성이다. 이 수준에서는 원격 DT가 위치와 자세를 갱신할 수는 있지만, 수신 상태값의 신뢰도는 판단하기 어렵다. Level 1은 항법 신뢰도와 센서 유효성 정보를 포함하여 상태 해석 기능을 제공한다. Level 2는 추진

Table 5. Payload comparison of information-level telemetry

Level	Payload and function
Level 0	32 B, 0.256 kbps, 1.14%. Basic state only.
Level 1	40 B, 0.320 kbps, 1.42%. Basic state and confidence.
Level 2	64 B, 0.512 kbps, 2.28%. State, confidence, and dynamic context.
Level 3	64 B + event, over 0.512 kbps. Level 2 with event packet.

기, 제어타, 침로 및 속도 변화와 같은 동적 맥락 정보를 추가하여 패킷 사이 상태 예측을 보완한다. Level 3는 이벤트 기반 보조 패킷을 결합하여 DVL 유실이나 항법 신뢰도 급락과 같은 상태 변화를 조기에 반영한다.

전송량 절감률은 식 (3)과 같이 계산한다.

$$\eta_R = \left(1 - \frac{R_{level}}{R_{raw}}\right) \times 100 \quad (3)$$

여기서 η_R 은 원시 데이터 스트림 대비 전송량 절감률을 의미한다. R_{raw} 은 원시 데이터 스트림의 payload 전송률이며, R_{level} 은 선택된 정보수준별 텔레메트리 구조의 payload 전송률이다.

Table 5의 Level 2 구조를 기준으로 하면 평균 전송량은 0.512 kbps이다. 이는 Table 4의 원시 데이터 참조값인 22.464 kbps의 약 2.28% 수준이며, payload 기준 전송량 절감률은 약 97.72%이다. 이 결과는 제안 구조가 원시 데이터를 단순히 낮은 주기로 샘플링하는 방식이 아니라, 원격 DT의 상태 갱신, 신뢰도 해석, 상태 예측에 필요한 정보를 중심으로 payload를 재구성하는 방식임을 보여준다.

다만 가장 낮은 전송량을 갖는 Level 0가 항상 가장 적절한 것은 아니다. 상태 신뢰도 정보가 없는 경우, 원격 DT는 수신된 위치와 자세가 정상 항법 조건에서 산출된 것인지 판단하기 어렵기 때문이다. 따라서 실제 운용에서는 전송량뿐 아니라 원격 DT의 상태 해석 가능성을 함께 고려해야 한다.

4.4 DVL 유실 상황의 시간축 예시

AUV 항법에서 DVL은 관성항법 오차 누적을 제한하는 중요한 보정 정보를 제공한다. DVL이 정상적으

로 동작하는 경우 원격 DT는 수신된 항법 상태를 비교적 신뢰 가능한 상태로 해석할 수 있다. 반면 DVL이 유실되면 AUV 내부 항법장치는 관성항법 기반 전파를 계속 수행할 수 있으나, 위치 오차는 시간이 지남에 따라 증가할 가능성이 있다.

이를 설명하기 위해 Table 6와 같은 단순 시간축 예시를 고려한다. 정기 패킷은 10초 주기로 전송된다고 가정한다. DVL 유실은 121초에 발생하고, Level 3의 이벤트 패킷은 이벤트 발생 후 1초 뒤 원격 DT에 수신된다고 가정한다. 본 예시에서는 DVL invalid 상태가 1초 이상 지속되는 경우를 이벤트 발생 조건으로 설정하였다.

Table 6에서 Level 0는 위치와 자세를 계속 수신하더라도 DVL 유실 여부를 알 수 없다. 따라서 원격 DT는 항법 신뢰도 저하를 명시적으로 해석하지 못한 채 상태 표시를 지속하게 된다. Level 1과 Level 2는 정기 패킷에 신뢰도 정보가 포함되므로, 다음 정기 패킷 수신 시점인 130초에 DVL 유실과 항법 신뢰도 저하를 인지할 수 있다. 이 경우 이벤트 발생 시점과 원격 DT의 인지 시점 사이에는 9초의 지연이 발생한다.

Table 6. DVL outage timeline and remote DT awareness

Time	Remote DT awareness
120 s	All levels update normal state. Level 1-3 also update normal confidence.
121 s	DVL outage occurs. Level 0 cannot detect it. Level 1-2 wait for the next periodic packet. Level 3 generates an event packet.
122 s	Level 3 recognizes DVL outage by event packet. Level 0-2 still cannot recognize it.
130 s	Level 1-2 recognize DVL outage by periodic packet. Level 3 reconfirms the degraded state.

Level 3는 이벤트 기반 보조 패킷을 사용하므로, DVL 유실 발생 후 정기 패킷 주기를 기다리지 않고 원격 DT에 상태 저하를 전달할 수 있다. Table 6의 예시에서는 122초에 이벤트 패킷이 수신되므로, 상태 저하 인지 지연은 1초로 감소한다.

4.5 상태 저하 인지 지연 지표

DVL 유실, 항법 품질 저하, 구동기 포화와 같은 이벤트가 발생했을 때 원격 DT가 이를 얼마나 빨리 인

지하는지는 운용상 중요한 지표가 될 수 있다. 본 연구에서는 이를 상태 저하 인지 지연, 즉 *confidence awareness delay*로 정의한다. 상태 저하 인지 지연은 식 (4)와 같다.

$$T_{CAD} = t_{aware} - t_{event} \quad (4)$$

여기서 T_{CAD} 는 상태 저하 인지 지연을 의미한다. t_{event} 는 DVL 유실 또는 항법 신뢰도 급락과 같은 이벤트가 실제로 발생한 시점이며, t_{aware} 는 원격 DT가 해당 이벤트 또는 신뢰도 저하를 인지한 시점이다.

Table 6의 예시에서 Level 1과 Level 2의 상태 저하 인지 지연은 9초이다. 반면 Level 3의 상태 저하 인지 지연은 1초이다. 이 비교는 이벤트 기반 보조 전송이 단순히 추가 정보를 보내는 기능이 아니라, 원격 DT의 상태 해석 지연을 줄이는 기능임을 보여준다. 다만 이벤트 패킷 역시 동일한 수중 음향통신 채널을 사용하므로, 실제 시스템에서는 이벤트 패킷의 우선순위, 지연, 손실 및 재전송 정책을 함께 고려해야 한다.

4.6 논의

본 장의 분석 결과는 수중 저대역 통신 환경에서 AUV 운용 DT를 구현할 때 핵심 상태정보 기반 텔레메트리 구조가 원시 데이터 중심 접근보다 더 실용적일 수 있음을 보여준다. 원시 데이터 참조값은 기본 센서 및 시스템 상태만 고려해도 약 22.5 kbps의 payload를 요구한다. 반면 제안한 Level 2 구조는 약 0.512 kbps의 payload로 기본 상태값, 상태 신뢰도, 동적 맥락 정보를 함께 제공할 수 있다.

또한 DVL 유실 예시는 상태값과 상태 신뢰도 정보의 차이를 보여준다. 상태값만 전송하는 Level 0 구조에서는 원격 DT가 위치와 자세를 계속 갱신할 수 있지만, 항법 품질 저하를 해석하기 어렵다. 반면 Level 1과 Level 2 구조에서는 정기 패킷을 통해 DVL 유효성 및 항법 신뢰도 저하를 인지할 수 있다. Level 3 구조에서는 이벤트 기반 보조 패킷을 통해 정기 패킷 주기에 따른 대기 시간을 줄이고, 상태 저하 인지 지연을 감소시킬 수 있다.

다만 본 장의 분석은 payload 기준의 예시적 산정과 단순 DVL 유실 시나리오에 기반한다. 실제 수중 음향통신 환경에서는 채널 상태, 패킷 손실, 재전송,

오류정정 방식, 전송 지연 등에 따라 유효 전송량과 상태 저하 인지 지연이 달라질 수 있다. 따라서 본 장의 결과는 제안 구조의 1차 적용 가능성을 보이기 위한 예시적 분석으로 해석하는 것이 적절하며, 향후 다양한 운용 조건에서의 추가 검토가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 수중 저대역 통신 환경에서 AUV 운용 DT의 상태 동기화를 위한 정보수준별 텔레메트리 구조를 제안하였다. 제안 구조는 AUV 운용 DT의 정보 전달 문제를 원시 데이터 복제가 아니라 핵심 상태 정보 동기화 문제로 정의하고, 원격 DT의 기능을 기준으로 전송 정보를 기본 상태정보, 상태 신뢰도 정보, 동적 맥락 정보, 이벤트 정보로 구분하였다.

또한 포함되는 정보 범위에 따라 Level 0부터 Level 3까지의 텔레메트리 구조를 구성하고, payload 기준 전송량과 DVL 유실 상황을 예시적으로 분석하였다. 분석 결과, 원시 데이터 참조값은 약 22.464 kbps로 산정된 반면, Level 2 구조는 약 0.512 kbps의 payload로 기본 상태값, 상태 신뢰도, 동적 맥락 정보를 함께 제공할 수 있었다. 또한 DVL 유실 예시를 통해 이벤트 기반 보조 전송이 원격 DT의 상태 저하 인지 지연을 줄이는 데 활용될 수 있음을 보였다.

본 연구의 의의는 AUV 운용 DT를 위한 정보전달 구조를 센서 데이터 중심이 아니라 원격 DT의 상태 갱신, 신뢰도 해석, 단기 예측, 이벤트 인지 기능 중심으로 정리한 데 있다. 다만 본 연구는 payload 기준의 예시적 전송량 산정과 단순 DVL 유실 시나리오에 기반하므로, 향후 다양한 통신 조건, 센서 상태, 임무 시나리오를 고려하여 제안 구조의 적용 가능성과 운용 상 한계를 추가적으로 검토할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] Bingbing Zhang, Daxiong Ji, Shou Liu, Xinke Zhu, & Wen Xu, 'Autonomous Underwater Vehicle Navigation: A Review,' *Ocean Engineering*, VOL. 273, 2023, Article 113861. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113861>
- [2] Milica Stojanovic & James Preisig, 'Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization,' *IEEE Communications Magazine*, VOL. 47,

NO. 1, 2009, pp. 84–89.

<https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4752682>

[3] Favour O. Adetunji, Niamh Ellis, Maria Koskinopoulou, Ignacio Carlucho, & Yvan R. Petillot, 'Digital Twins Below the Surface: Enhancing Underwater Teleoperation,' in Proceedings of the OCEANS 2024 – Singapore, Singapore, 2024, Article 10682270.

<https://doi.org/10.1109/OCEANS51537.2024.10682270>

[4] Yingliang Chen, Yijia Luo, Jialin Liu, Jinzhuo Zhu, Yong Zou, Kai Lv, Jinchuan Chen, Baorui Xu, & Hongyuan Li, 'Digital Twin System for Multi-Scale Motion Prediction of Unmanned Underwater Vehicles,' Journal of Marine Science and Engineering, VOL. 14, NO. 6, 2026, Article 557.

<https://doi.org/10.3390/jmse14060557>

[5] Jing Yan, Tianyi Zhang, Xinping Guan, Xian Yang, & Cailian Chen, 'Digital Twin-Driven Swarm of Autonomous Underwater Vehicles for Marine Exploration,' Communications

Engineering, VOL. 5, 2026, Article 18.

<https://doi.org/10.1038/s44172-025-00571-7>

[6] Chul Hyun, Donggeon Kim, Hyunseung Kim, & Dongmin Jeong, 'Proposal of a Lightweight Digital Twin Framework for AUV Operational Optimization,' Journal of the Korean Institute of Defense Technology, VOL. 7, NO. 1, 2025, pp. 13–19.

[7] Jun-Bo Zhao, Xi-Yun Ge, Xuc-Lci Feng, & Hong-Kun Zhou, 'A Review of Underwater SINS/DVL Integrated Navigation Technology,' Journal of Unmanned Undersea Systems, VOL. 26, NO. 1, 2018, pp. 2–9.

<https://doi.org/10.11993/j.issn.2096-3920.2018.01.001>

[8] Toby Schneider & Henrik Schmidt, 'A State Observation Technique for Highly Compressed Source Coding of Autonomous Underwater Vehicle Position,' IEEE Journal of Oceanic Engineering, VOL. 38, NO. 4, 2013, pp. 796–808.

<https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2268292>