

前端感知设备软件接口架构与通信协议深度评估报告

1. 执行摘要

本报告旨在对《前端感知设备软件数据表 V0.1》进行详尽的技术评估与设计验证。该文档定义了一个高性能前端感知系统(Front-End Sensing System, FES)的软件接口架构，该系统集成了一个中央信号处理系统(Signal Processing System, SPS)、三个分布式数据采集控制系统(Data Acquisition Control System, DACS 1-3)、天馈射频前端以及辅助的时统与倾角传感器子系统。

基于提供的设计文档¹及广泛行业技术标准(IEEE 802.3, TIA/EIA-644, GJB相关标准)，本评估发现该系统采用了一种混合通信拓扑：利用10Gbps以太网处理海量雷达IQ数据回传与高层控制，同时保留传统的串行总线(LVDS, RS422, RS485)用于底层硬件控制与状态监测。虽然这种架构在现代雷达设计中颇为常见，但在协议鲁棒性、时序确定性以及波束指向精度实现方面存在显著的风险点。

特别是，本报告深入分析了Ku波段(15.5-16.5 GHz)操作环境下，0.0025°的波束偏转指令分辨率与物理移相器量化精度之间的矛盾，指出了简单的XOR校验在复杂电磁环境下的脆弱性，并对基于UDP的控制指令重传机制在实时性方面的潜在隐患进行了量化分析。报告最终提出了一系列针对性的优化建议，包括迁移至CRC-16/32校验、引入应用层分片机制、优化重传策略以及采用数字波束形成(DBF)技术来弥补模拟硬件的精度限制，以确保系统从原型验证阶段顺利过渡到工程部署阶段。

2. 系统架构与拓扑设计深度分析

2.1 分布式处理架构与数据流向

前端感知设备采用以信号处理系统 (SPS) 为核心的星型网络拓扑结构。根据数据表定义, SPS (IP: 192.168.0.100) 作为主控节点, 负责统筹整个探测周期的资源调度; 而三个数据采集控制系统 (DACS 1-3, IP: 192.168.0.200-202) 则作为边缘计算或数据汇聚节点, 承担着模数转换 (ADC)、数字下变频 (DDC) 以及底层硬件驱动的职责¹。

这种“一控三”的架构设计隐含了相控阵雷达常见的子阵列 (Sub-array) 处理思想。

- 冗余与容错: 将采集任务分散到三套独立的DACS中, 不仅提高了总线吞吐能力 (总计3x 10Gbps物理链路), 还提供了系统级的容错能力。若DACS 1发生故障, SPS可通过软件重构, 仅利用DACS 2和3维持部分扇区的探测能力, 实现系统的“优雅降级”(Graceful Degradation)。
- 同步挑战: 分布式架构最大的挑战在于同步。文档提到的“秒脉冲同步传输波束安排表”和“CPI同步传输回波数据”¹至关重要。在Ku波段, 波长仅为约1.8cm-1.9cm², 这意味着分布在不同DACS控制下的天线阵元之间的相位同步误差必须控制在极小范围内 (通常小于 $\lambda/10$), 这对时统系统 (由RS485总线提供时间信息) 和硬连线触发信号提出了极高的抖动要求。

2.2 通信接口的异构性与带宽分配策略

系统设计中表现出明显的接口异构性, 这种设计通常是为了在带宽、延迟和电磁兼容性 (EMC) 之间寻找平衡。

接口类型	协议栈	物理速率	应用场景	关键性评估
Ethernet/光纤	UDP/IP	10 Gbps	原始回波数据、控制指令	极高。这是系统的主动脉, 承载99%的数据流量。
LVDS	自定义串行	5 Mbps	天线波束控制、射频参数	高。直接控制辐射源, 需极高的抗干扰能力。
RS485	自定义/NMEA	TBD	BDT时间、位置信息	中。提供时间基准, 波特率限制了时间更新频率。

RS422	自定义/Hex	TBD	倾角传感器数据	低。辅助数据,更新率要求较低。
-------	---------	-----	---------	-----------------

10Gbps链路的带宽利用率分析:

文档中明确, DACS向SPS发送的“回波采样数据”包含短码和长码采样点数1。在15.5-16.5 GHz的Ku波段雷达中, 为了实现高距离分辨率, 信号带宽往往很大(表A.3中最大支持127.5 MHz带宽)。

- **数据量估算:** 假设采样率为200 MSPS(满足100MHz带宽的奈奎斯特采样), 16位量化(2字节), IQ双通道。

$$\$\$ \text{Data Rate} = 200 \times 10^6 \times 2 \times \text{bytes} = 800 \text{ MB/s} = 6.4 \text{ Gbps} \$\$$$
- **结论:** 单个通道的原始数据流已占用10GbE链路约64%的带宽。如果DACS需要汇聚多个通道(如和路、差路), 带宽将瞬间饱和。这解释了为何系统选择UDP而非TCP——TCP的拥塞控制和确认机制在接近线速(Line Rate)传输时会导致严重的吞吐量抖动³。

5Mbps LVDS链路的合理性:

LVDS(低压差分信号)通常支持几百Mbps甚至Gbps的速率⁵, 此处限制在5 Mbps显得较为保守。这可能是出于传输距离或抗干扰的考虑。在雷达天线阵面内部, 大功率T/R组件的开关会产生强烈的电磁脉冲。LVDS采用350mV的低电压摆幅和差分传输方式, 具有极强的共模抑制能力, 且辐射极低⁶。限制速率有助于在较长的布线(如从机箱到阵面)上保持信号完整性, 减少码间干扰(ISI)⁷。

3. 高速数据传输层评估(Ethernet & UDP)

3.1 协议选择: 可靠性与实时性的博弈

系统明确规定所有以太网通信均采用**UDP单播协议¹**。这包括回波数据(端口1003x)和控制命令(端口1001x)。

UDP用于控制指令的风险:

UDP是无连接、不可靠的协议。虽然它非常适合容忍少量丢包的雷达回波流(丢掉几个脉冲通常只影响信噪比, 不影响检测), 但用于传输控制指令(如“波束指向”、“发射开/关”)则存在巨大风险。如果一条“停止发射”的指令丢失, 雷达可能持续辐射, 导致硬件过热或违规操作⁸。

应用层可靠性机制分析:

为了弥补UDP的缺陷, 文档设计了一套应用层重传机制:

1. 命令响应标志：发送方设置标志位要求接收方回复。
2. 超时重发：“发送方在一定时间后如未接收到命令响应，则需采用三次重发机制”¹。
3. 命令序号(**Sequence ID**)：16位循环计数器，用于匹配请求与响应。

深度洞察：这种机制本质上是在UDP之上重新实现了一个简化版的TCP“停止-等待”(Stop-and-Wait)协议。

- 潜在死锁与延迟累积：文档未定义具体的“一定时间”(Timeout)。在雷达实时控制中，这个超时时间必须小于探测周期的空闲时间(Dead Time)。如果设定过长(例如秒级)，一旦发生丢包，系统将陷入等待，导致后续波束调度积压，破坏实时性(Real-time constraints)¹⁰。
- 建议：鉴于以太网交换机在拥塞时通常会优先丢弃UDP包，建议引入**QoS(服务质量)**策略。在IP包头中设置DSCP(DiffServ Code Point)值为EF(Expedited Forwarding)，确保控制指令在交换机队列中享有最高优先级，不会被大流量的回波数据“挤掉”¹¹。此外，重传策略应采用更激进的短超时(例如5-10ms)，以确保在单个CPI周期内完成纠错¹²。

3.2 数据分片与MTU隐患

回波数据包的大小是动态的(\$N \times M \times 4B\$)。雷达的原始数据块通常非常大。例如，一个包含4096个采样点的脉冲数据量为16KB。

- **IP分片(Fragmentation)的危险**：标准以太网MTU为1500字节。一个16KB的UDP数据报会被IP层切割成约11-12个分片。
- **丢包放大效应**：在UDP协议下，只要这11个分片中丢失任何一个，接收端的操作系统内核就会因为无法重组而丢弃整个16KB的数据报⁹。这使得实际的包错误率(PER)被放大了10倍以上。
- **性能瓶颈**：这种分片和重组工作由CPU完成，会产生大量的中断和上下文切换，严重消耗SPS的计算资源，限制了其处理雷达算法的能力¹⁴。
- **优化方案**：强烈建议系统设计中明确要求支持巨型帧(**Jumbo Frames**)，将MTU提升至9000字节，大幅减少分片数量和头部开销¹⁶。或者，在DACS软件层面对数据进行应用层分包，使其适配MTU，这样即使丢失一个包，SPS也能收到其余数据，通过算法插值弥补，而非整段丢弃。

4. 波束控制与量化精度评估

4.1 0.0025° 分辨率与物理实现的鸿沟

数据表中最引人注目的参数之一是“天线方位/俯仰指向”控制字，其量化单位为0.0025度¹。这意味着控制指令可以指定例如\$45.0025^\circ\$的波束指向。

物理可行性分析：

在Ku波段相控阵雷达中，波束指向由每个阵元的移相器(Phase Shifter)控制。

- 移相器位数：商业级和军用级微波移相器通常为5位或6位，最高达到7位或8位¹⁷。
 - 6位移相器的最小相位步进(LSB)为 $\$360^\circ / 2^6 = 5.625^\circ$ 。
 - 7位移相器的LSB为 2.8125° 。
- 波束指向步进：波束指向角 θ 与相位差 $\Delta\phi$ 的关系为 $\sin\theta = \frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi d}$ 。即便使用高精度的移相器，物理波束的最小偏转步进通常也在0.1°到0.5°量级，远无法直接达到0.0025°的物理精度。

深度洞察：指令分辨率 vs. 物理分辨率

这种设计存在显著的“虚高”现象，即软件指令精度远超硬件执行能力。

- 直接截断风险：如果DACS简单地将0.0025°的指令四舍五入到最近的移相器状态，将产生周期性的量化相位误差。这种误差在天线方向图中表现为**量化旁瓣(Quantization Sidelobes, QSL)**的升高，严重降低雷达的杂波抑制能力和动态范围¹⁹。
- 可能的实现技术：要利用0.0025°的指令精度，系统必须采用更高级的技术：
 1. 相位抖动(Phase Dithering)：在一个CPI内的不同脉冲间，随机或伪随机地改变移相器的LSB状态，使得平均指向精度提高¹⁷。
 2. 数字波束形成(DBF)：如果系统是数字阵列(每个阵元或子阵都有独立ADC)，则波束形成是在数字域完成的。数字域的乘法运算可以轻易达到32位或64位浮点精度，完全可以实现0.0025°的指向，这是现代高性能雷达的发展趋势²⁰。
 3. 校准查找表(LUT)：系统可能包含庞大的校准表，将理想角度映射到经过非线性校正的移相器状态组合，以补偿硬件误差²²。

结论：0.0025°的设计暗示了该系统可能不仅仅是一个简单的模拟相控阵，而极有可能采用了数字波束形成架构，或者在DACS内部运行着复杂的相位优化算法。

4.2 波形参数编排的灵活性

表A.3显示系统支持LFM(线性调频)、NLFM(非线性调频)和相位编码信号，且带宽、脉宽均可调(0.5MHz/0.5us步进)。

- **MGC增益控制(0.5dB步进)**：这种精细的增益控制允许实现高级的灵敏度时间控制(STC)。在接收近距离强杂波时降低增益，随距离增加提高增益，防止ADC饱和。由于通过LVDS传输这些参数需要时间(24字节约需40-50微秒)，这种增益调整很可能是**基于CPI(批次)**

而非基于脉冲的, 或者DACS内部有预加载的STC曲线。

5. 辅助传感器集成与时空基准

5.1 北斗时统系统的协议规范

系统明确提到了“北斗设备通信协议”(附录C2)和RS485接口传输“时间、位置信息”¹。

- **时间基准差异:** 北斗系统使用**BDT (BeiDou Time)**, 其起始历元为2006年1月1日UTC 00:00:00。BDT与UTC之间存在闰秒差异(目前BDT = UTC + 4s, BDT = GPS - 14s)²³。
- **协议风险:** 表中注明协议为“自定”。这极易引发集成错误。如果SPS软件按照UTC解析时间, 而时统发送的是BDT, 将导致4秒的时间戳误差。在多雷达组网或与AIS(船舶自动识别系统)融合时, 这种误差是不可接受的。
- **建议:** 强制要求RS485接口输出标准化的**NMEA 0183**语句(如\$GBZDA)或二进制协议, 并在ICD中明确定义时间字段是UTC还是BDT, 是否包含闰秒偏移量²⁵。

5.2 倾角传感器的修正作用

倾角传感器通过RS422上传“水平测量数据”¹。

- **数据融合:** 对于车载或舰载雷达, 平台并非水平。雷达测得的“天线坐标系”下的目标位置(\$Az, El\$)必须利用倾角数据(Roll, Pitch)构建旋转矩阵, 转换到“地理坐标系”(\$Az_{geo}, El_{geo}\$)。
- **刷新率要求:** 如果平台处于运动状态(如海浪中的船), 倾角变化很快。RS422链路必须提供足够的刷新率(例如>50Hz)以实现实时补偿。如果采用Modbus RTU协议, 由于其主从问答机制的延迟, 可能无法满足高动态补偿需求, 需评估是否支持主动流式传输模式²⁷。

6. 协议完整性与底层数据结构评估

6.1 “55AA” 帧头的健壮性分析

串行协议定义了固定包头55AAH¹。

- 位同步优势: 0x55 (01010101) 和 0xAA (10101010) 具有丰富的电平跳变, 非常有利于UART接收器的时钟恢复和同步。
- 伪同步风险: 在二进制数据流中, 55AA出现的概率并不低(\$1/65536\$)。如果载荷数据中恰好包含了55AA, 接收机可能会错误地将其识别为帧头, 导致“丢帧”或“乱码”。
- 补救措施: 协议中包含了“数据长度”字段, 这是一个很好的设计。接收机必须实施严格的校验逻辑: 检测到55AA -> 读取长度L -> 读取L个字节 -> 计算校验和。只有校验和匹配才认为是一帧有效数据。更严谨的做法是引入转义机制(**Byte Stuffing**), 将数据域中的55转义, 但这会增加协议复杂度。

6.2 校验和(Checksum)的安全性漏洞

最为关键的缺陷在于, 文档指定串行通信使用异或校验和(**XOR Sum**)¹。

- 数学缺陷: XOR校验的汉明距离(Hamming Distance)仅为2。
 - 它可以检测出奇数个比特位的翻转。
 - 它无法检测偶数个比特位的翻转(例如同一位置的两个位同时出错)。
 - 它无法检测字节顺序的交换(例如0x12 0x34和0x34 0x12的异或和是一样的)²⁹。
- 场景模拟: 在雷达高功率发射期间, EMI可能导致RS422线缆上出现突发噪声(Burst Error), 造成连续多个比特翻转。如果恰好翻转了偶数个位, XOR校验将通过, DACS将执行错误的波束指向指令。
- 强制建议: 必须立即废弃XOR校验, 全面升级为**CRC-16**(如CRC-16-CCITT)。CRC利用多项式除法, 对突发错误、双位错误具有极高的检出率³⁰。现代MCU计算CRC-16的开销极低, 甚至有硬件加速支持。

6.3 大小端模式(Endianness)的隐患

文档规定:“多字节数据传输, 先低后高”(Little Endian)¹。

- 冲突点: TCP/IP网络协议的标准字节序是**Big Endian**(网络字节序)。而SPS(假设是x86架构)和DACS(假设是ARM或FPGA Nios/MicroBlaze)可能是Little Endian。
- 开发陷阱: 软件工程师在编写网络收发代码时, 如果直接使用memcpy将结构体复制到UDP

缓冲区，就会产生Little Endian数据。如果不经过htons/ntohs转换直接发送，虽然符合该文档的“先低后高”规定，但违背了网络协议惯例，且容易造成调试困惑。

- 评估：文档明确规定了字节序是积极的，消除了歧义。但在实现时，必须在网络层(UDP payload)和应用层之间建立严格的序列化/反序列化(Serialization/Deserialization)层，严禁直接内存拷贝。

7. 系统健壮性与未来演进

7.1 故障监测的局限性

天馈系统向DACS回传的数据中仅包含一个“故障字节”(表B.1, 第12项)¹。对于一个包含成百上千个T/R组件的相控阵天线，仅用1个字节(8比特)来报告健康状态是远远不够的。

- 改进：建议扩展协议，支持“详细自检模式”。SPS可以发送特殊指令，请求天线上传具体的故障代码、阵元温度图、电源电压遥测值等。这对于系统的**预测性维护(Predictive Maintenance)**至关重要。

7.2 迈向RoCE与RDMA

随着雷达向更高带宽(如Ka波段、太赫兹)和更大阵列发展，10Gbps UDP将成为瓶颈。CPU在处理大量小包中断时效率低下。未来的设计应考虑**RDMA over Converged Ethernet (RoCE)**技术，允许DACS直接将数据写入SPS的内存，绕过CPU内核，实现真正的零拷贝传输，极大地降低延迟和CPU负载³。

8. 详细场景模拟与故障分析 (FMEA)

为了验证设计的鲁棒性，我们模拟以下极端场景：

场景 1：以太网链路饱和与控制指令丢失

- 条件：雷达工作在最大带宽模式，回波数据占满10Gbps链路。此时SPS发送“紧急关机”指

令。

- 失效模式：由于未配置QoS，交换机缓存被巨大的回波数据流填满，微小的控制指令包（几十字节）在尾部被丢弃（Tail Drop）。
- 后果：指令丢失。SPS触发3次重试，每次等待超时。关机动作延迟数百毫秒甚至数秒，可能导致硬件损坏。
- 缓解措施：实施**VLAN**优先级标记（802.1p/Q），将控制指令标记为最高优先级，确保其在拥塞时优先转发。

场景 2：串行链路的EMI干扰

- 条件：雷达发射大功率脉冲，RS422线缆屏蔽层接地不良，感应出尖峰电压。
- 失效模式：“波束指向”指令中的两个比特发生翻转，异或校验值巧合地未发生变化（概率约为 $1/256$ 对于单字节，但对于特定错误模式概率更高）。
- 后果：天线指向错误的方位。雷达接收到杂波或干扰源信号，SPS处理产生虚假目标。
- 缓解措施：采用**CRC-16**校验，将漏检率降低到 $1/2^{16}$ 以下，并具备极强的抗突发干扰能力。

9. 结论与战略建议

《前端感知设备软件数据表 V0.1》构建了一个基于现代以太网技术和传统串行总线相结合的混合控制架构，为原型机的开发提供了清晰的基线。其采用10GbE传输IQ数据符合软件定义雷达（SDR）的主流趋势。然而，文档中存在的“遗留技术特征”（如XOR校验、低速LVDS、UDP重传逻辑简陋）在面对Ku波段高精度、高可靠性的作战或监测需求时，显得力不从心。

核心建议清单：

1. 数据完整性升级（**Critical**）：所有串行接口（LVDS, RS422, RS485）的校验算法必须从XOR升级为**CRC-16**。这是零成本提升可靠性的最有效手段。
2. 网络传输优化（**High**）：
 - 强制启用**巨型帧（Jumbo Frames, MTU 9000）**以降低CPU负载。
 - 在以太网交换机和网卡驱动中配置**QoS**策略，优先保障控制端口（1001x）的流量。
 - 优化UDP重传逻辑，采用**短超时（<5ms）**策略，避免跨越CPI周期的延迟累积。
3. 接口能力挖掘（**Medium**）：重新评估LVDS链路的速率限制。如果硬件允许，将速率提升至50Mbps以上，以减少控制指令传输的死区时间（Dead Time），提升雷达的脉冲重复频率（PRF）上限。
4. 标准化与规范化（**Medium**）：明确时统接口遵循**NMEA 0183**或特定二进制标准，并清晰定义时间基准（UTC vs BDT）。
5. 精度对齐（**Low**）：在软件说明中增加关于“波束指向0.0025°”的实现说明（如是否采用数字波束形成或相位抖动技术），以指导后续的校准和测试工作。

通过实施上述改进，该前端感知系统将具备更强的抗干扰能力、更低的处理延迟以及更确定的实

时响应特性, 从而满足高性能雷达系统的严苛要求。

报告结束

引用的著作

1. 软件数据表V0.1.docx
2. Ku band - Wikipedia, 访问时间为十一月 21, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Ku_band
3. 10Gb Ethernet vs sFPDP - Galleon Embedded Computing, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://galleonec.com/10gb-ethernet-vs-sfpdp/>
4. WHAT IS 10GBIT LINE RATE? - FMADIO, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://www.fmad.io/blog/what-is-10g-line-rate>
5. Performance of LVDS with different cables - Texas Instruments, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://www.ti.com/lit/pdf/slyt163>
6. LVDS Signals Crashcourse | Advanced PCB Design Blog | Cadence, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://resourcespcb.cadence.com/blog/2023-lvds-signals-crashcourse>
7. AN-960: RS-485/RS-422 Circuit Implementation Guide - Analog Devices, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-960.html>
8. Why is UDP an unreliable transport protocol? - Tencent Cloud, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://www.tencentcloud.com/techpedia/103161>
9. UDP is not reliable at all? - Stack Overflow, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://stackoverflow.com/questions/24290913/udp-is-not-reliable-at-all>
10. What are good UDP timeout and retry values? - Stack Overflow, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://stackoverflow.com/questions/7150868/what-are-good-udp-timeout-and-retry-values>
11. java - How to minimize UDP packet loss - Stack Overflow, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://stackoverflow.com/questions/8267271/how-to-minimize-udp-packet-loss>
12. Real-time Ethernet (UDP) worst-case round-trip time monitoring - OSADL, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://www.osadl.org/Real-time-Ethernet-UDP-worst-case-round-trip-time-monitoring.html>
13. How does UDP handle fragmentation and reassembly of packets? - Backup Education, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://backup.education/showthread.php?tid=1860>
14. [1706.00333] Achieving reliable UDP transmission at 10 Gb/s using BSD socket for data acquisition systems - arXiv, 访问时间为十一月 21, 2025, <https://arxiv.org/abs/1706.00333>
15. Achieving reliable UDP transmission at 10 Gb/s using BSD socket for data acquisition systems | Semantic Scholar, 访问时间为十一月 21, 2025,

<https://www.semanticscholar.org/paper/914a29dd29e3901943dcbe971cacf53a534f765d>

16. Best practices for handling UDP fragmentation on microcontrollers : r/embedded - Reddit, 访问时间为 十一月 21, 2025,
https://www.reddit.com/r/embedded/comments/1n0g6qn/best_practices_for_handling_udp_fragmentation_on/
17. Optimized Beam Steering Approach for Improved Sidelobes in Phased Array Radars Using a Minimal Number of Control Bits - IEEE Xplore, 访问时间为 十一月 21, 2025, <https://ieeexplore.ieee.org/ielam/8/7000612/6942173-aam.pdf>
18. General Disclaimer One or more of the Following Statements may affect this Document - NASA Technical Reports Server, 访问时间为 十一月 21, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19760023359/downloads/19760023359.pdf>
19. Motion-Compensated Steering: Enhanced Azimuthal Resolution for Polarimetric Rotating Phased Array Radar - the NOAA Institutional Repository, 访问时间为 十一月 21, 2025,
https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/31720/noaa_31720_DS1.pdf
20. Quantization Analysis for Reconfigurable Phased Array Beamforming - IEICE, 访问时间为 十一月 21, 2025,
https://www.ieice.org/cs/isap/ISAP_Archives/2006/pdf/2D1a-5.pdf
21. Analysis of Quantization Noise Suppression Gains in Digital Phased Arrays The research was funded by the strategic innovation program Smarter Electronics System, Vinnova, Sweden. - arXiv, 访问时间为 十一月 21, 2025,
<https://arxiv.org/html/2405.00830v2>
22. TX Phase Shifter Calibration Theory - TI E2E, 访问时间为 十一月 21, 2025,
https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/1023/0513.AWRx_5F00_TX_5F00_Channel_5F00_Calibration_5F00_Script_5F00_User_5F00_Guide.pdf
23. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document, 访问时间为 十一月 21, 2025,
<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201902/P020190227702348791891.pdf>
24. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document, 访问时间为 十一月 21, 2025,
<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202001/P020231201549662978039.pdf>
25. NMEA 0183 - Wikipedia, 访问时间为 十一月 21, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/NMEA_0183
26. NMEA Revealed - GitLab, 访问时间为 十一月 21, 2025,
<https://gpsd.gitlab.io/gpsd/NMEA.html>
27. TILT-5x Dynamic Inclinometer - CTi Sensors, 访问时间为 十一月 21, 2025,
<https://ctisensors.com/products/tilt-5x-dynamic-inclinometer/>
28. aca616t/aca626t digital type modbus inclinometer, 访问时间为 十一月 21, 2025,
<https://www.rian-tech.net/en/static/upload/file/20240407/1712453460621729.pdf>
29. What is the difference between CRC and checksum? - Quora, 访问时间为 十一月 21, 2025,
<https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-CRC-and-checksum>

30. The Effectiveness of Checksums for Embedded Control Networks - Electrical and Computer Engineering, 访问时间为 十一月 21, 2025,
https://users.ece.cmu.edu/~koopman/pubs/maxino09_checksums.pdf
31. What's the best CRC polynomial to use? - Better Embedded System SW, 访问时间为 十一月 21, 2025,
<https://betterembsw.blogspot.com/2010/05/whats-best-crc-polynomial-to-use.html>