

Albert Csongor, Békési Bertold, Jámbor Krisztián

A repülésben használt Ethernet-alapú adathálózat, az AFDX

Kutatásunk középpontjában az ARINC 664-P7 áll, egy fejlett, determinisztikus adatátviteli hálózati szabvány, amelyet a modern repüléstechnikai rendszerekben használnak, például az Airbus és a Boeing legújabb repülőgépein. Az IEEE¹ 802.3 Ethernet-technológiára épül, kiegészítve speciális protokollkiterjesztésekkel a nagy megbízhatóság és az alacsony késleltetés érdekében. A rendszer három fő eleme a végponti rendszerek (adatküldés és -fogadás), a kapcsolók (adatcsomagok irányítása) és a virtuális kapcsolatok (logikai kapcsolatok a végpontok között). Az ARINC 664-P7 biztosítja az adatátvitel integritását, az ütközésmentességet és a redundanciát, támogatva a valós idejű kommunikációt repüléstechnikai környezetekben.

Kulcsszavak: Ethernet, adatkapcsolat, avionika

1. Bevezetés az Avionikai Full Duplex Ethernet működésébe

A légi járművek üzem közben számos érzékelő adatát használják fel, ezen adatok eljuttatása a megfelelő szabályzást végző döntéshozó szervek vagy a megjelenítő eszközök felé létfontosságú, és ezek mellett szigorú minőségi követelményeknek kell hogy megfeleljen. Ezeket korábban különféle adatbuszok segítségével végezték, azonban napjainkban a gépjárműiparhoz hasonlóan Ethernet-alapú megoldásra cserélik le. Ezt az indokolja, hogy a régebbi járművekhez képest a maiakban jelentősen több érzékelő adatát kell a feldolgozóegységek felé továbbítani, amit a régebbi adatbuszok már kevésbé képesek hatékonyan megvalósítani.

A repülésben használt Ethernet-alapú adathálózat az AFDX, azaz az Avionics Full Duplex kapcsolt Ethernet-hálózat, amelyet az ARINC-664 szabvány ír le. Az ARINC 664-P7 kommunikációs hálózat egy fejlett, determinisztikus adatátviteli rendszer, amely túlmutat a hagyományos adatbusz funkcióin. Számos modern repülőgéptípusban, például az Airbus A380, A350, A400M, a Boeing 787 Dreamliner, a COMAC ARJ21 és a Suhoj Superjet 100 fedélzetén alkalmazzák, és várhatóan az új generációs polgári repülőgépek szabványos kommunikációs hálózatává válik, megbízhatósága miatt. Az ARINC 664-P7 alapját a kereskedelmi célokra

¹ Institute of Electrical and Electronics Engineers – egy nemzetközi szakmai szervezet, amely elektronikai, villamosmérnöki, valamint számítástechnikai tudományokhoz kapcsolódó szabványok kidolgozásával is foglalkozik.

kifejlesztett, végrendszerkapcsolatok kommunikációs technológiája képezi, ezért az olyan fogalmak, mint a végrendszer, gyakran előfordulnak benne [1], [2].

Az ARINC 664-P7, amelyet Aviation Full Duplex Switched Ethernet néven is ismernek, az IEEE 802.3 szabvány szerinti 10/100 Mbps-os Ethernet-technológiára, MAC²-címezésre, IP-protokollokra és UDP-re épül. Ezt azonban speciális protokollkiterjesztések és forgalommenedzsment egészíti ki annak érdekében, hogy a repüléstechnikai alkalmazásokhoz szükséges determinisztikus viselkedést, redundanciát és megbízhatóságot biztosítsa [1], [2].

A hálózat három fő elemből áll:

- végponti rendszer (*End-System*): az a készülék, amely adatokat küld vagy fogad a hálózaton keresztül;
- kapcsoló (*Switch*): forgalomkezelést, szűrést és az adatcsomagok célállomások felé irányítását végzi;
- virtuális kapcsolatok (*Virtual Links*): ezek egyirányú logikai kapcsolatokat biztosítanak a végpontok között, egy vagy több célállomás számára. Ez a működés hasonló az ARINC 429 protokollban alkalmazott technikákhoz.

A forgalmat az ARINC 664-P7 kapcsolók konfigurációs táblázatok alapján irányítják, amelyek garantált sávszélességet, késleltetést, rendelkezésre állást és integritást írnak elő. Ez kulcs szerepet játszik a rendszer fokozatos tanúsítási folyamatában.

Az Ethernet-technológia, amely az 1970-es években jelent meg, nagyon vonzó a repüléstechnikai alkalmazások számára. Bizonyított megbízhatósága, alacsony költsége és nagy sávszélessége jelentős előrelépést kínál a korábbi adatbuszokhoz képest. Az Ethernet csomagkapcsolt hálózat, amely általában csillagtopológiában működik, és az adatokat keretek formájában továbbítja [1], [2], [3], [4].

2. Ethernet-keretformátum

Az Ethernet-keret egy olyan alapvető adatstruktúra, amelyet az Ethernet-alapú hálózatokban az adatok továbbítására használnak. A keret több részből áll, amelyek mindegyike meghatározott funkciót lát el, biztosítva a megbízható kommunikációt a hálózatban található eszközök között. Az 1. ábrán részletesen bemutatjuk a keret felépítését és szerepét [1], [2], [4], [12].

2.1. Előtag (*preamble*)

A keret elején található preamble egy speciális bitmintát tartalmaz, amely értesíti a fogadó terminálokat arról, hogy egy új keret érkezik. Ez lehetővé teszi a hálózati eszközök számára, hogy előkészüljenek az adatfogadásra. Ezenkívül a preamble segíti az időzítés pontos szinkronizálását a küldő és a fogadó között, különösen nagy sebességű adatátvitel esetén [1], [5].

² Media Access Control Address – hálózati eszközök egyedi, fizikai címe.

2.2. A keret kezdete

A keretkezdet-határoló egyedi bitminta, amely egyértelműen jelzi a keret elejét. Ez kulcsfontosságú a fogadó eszközök számára, mert ezzel szinkronizálják a keret vételét, és biztosítják, hogy az adatokat pontosan a megfelelő pozícióból kezdjék olvasni [1], [5].

2.3. Cél- és forráscímek

A forráscím egyedi azonosító, amely meghatározza, melyik terminál küldte a keretet. A cél-cím alapján állapítja meg a hálózat, hogy az adatokat hová kell továbbítani. A célcím lehet:

- egyetlen terminál címe (*Unicast*);
- terminálok egy csoportja (*Multicast*);
- az összes terminálon történő átvitel (*Broadcast*) [1], [6].

2.4. Hosszmező

A hosszmező jelzi a keretben található adatbájtok számát. Egy bájttal 8 bitből áll, így ez az érték meghatározza, hogy a keret mekkora adatmennyiséget tartalmaz. Ez fontos a fogadó eszköz számára, hogy pontosan tudja, meddig tart az adat, és hol kezdődik a keret vége [1], [5], [6].

2.5. Adatrész

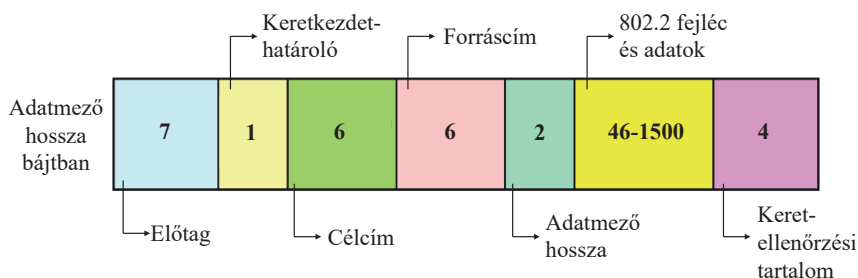
Ez a keret legfontosabb része, amely az átvitelre szánt tényleges adatot tartalmazza. Az adat lehet például egy fájl egy része, egy üzenet vagy egy hálózati protokoll vezérlőinformációja. Az adatrész mérete rugalmas, de a hálózati szabványok előírják a minimális és maximális méreteket [1], [5], [6].

2.6. Keretellenőrzési sorrend³

A keret végén található ciklikus redundancia-ellenőrzési (CRC-⁴) kód a hibák felismerésére szolgál. Ez egy matematikai algoritmus alapján generált ellenőrző sorozat, amelyet a küldő eszköz hoz létre az adat és a címek alapján. A fogadó eszköz újraszámolja a CRC-t, és összehasonlítja a kapott értékkel. Ha az értékek eltérnek, az azt jelzi, hogy hiba történt az átvitel során, és a keretet el kell utasítani vagy újra kell kérni [1], [5], [6], [12].

³ FCS – Frame Check Sequence.

⁴ Cyclic Redundancy Check.



1. ábra
Ethernet keretformátum (a szerzők [1] alapján)

3. Hálózati topológia

Az ARINC 664-P7 avionikai hálózat egy csillagtopológián alapuló rendszer, amely két avionikai részre van osztva. Mindkét rész számos avionikai rendszer számítástechnikai eleméből áll, amelyek mindegyike egy végponti terminált tartalmaz. A végponti terminálok az adott tartományon belül egy tartományi hálózati kapcsolón keresztül kommunikálnak egymással. A tartományok közötti kommunikációt szintén a kapcsolók biztosítják, amelyek adatcsomagokat továbbítanak az adó és a vevő között. A kapcsolók szükség esetén képesek az üzeneteket több előfizetőnek is továbbítani [1], [4].

A hálózat fizikai rétege Ethernet Cat5 szabványnak felel meg, amely 10–100 Mbps sebességet biztosít, és a repülési környezet igényeinek megfelelően megerősített alkatrészekből áll. Az Airbus A380 esetében a kapcsoló egy 2-MCU⁵ LRU⁶ cserélhető egység formájában valósul meg, míg a végponti terminál egy alkalmazásspecifikus integrált áramkörre (ASIC⁷) épül, amely egy PCI-⁸ áramköri kártyán helyezkedik el [1], [4].

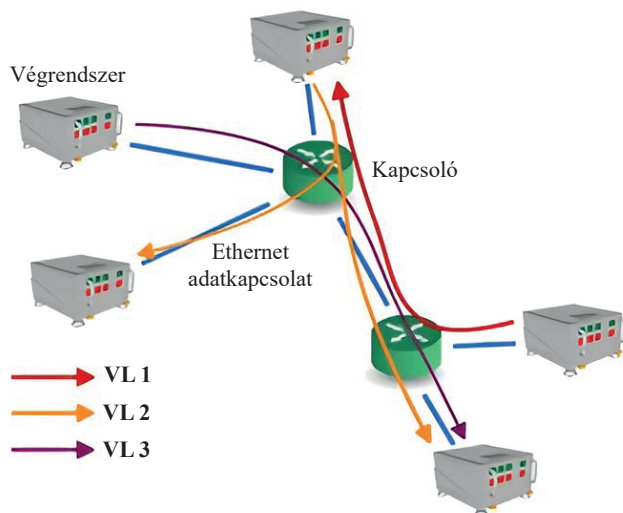
A fejlettebb ARINC 664-P7 hálózatok esetében a kettős csatornás, kettős redundáns kapcsolt csillagtopológia alkalmazására kerül sor. Minden végponti terminálnak két független kommunikációs útvonala van (A és B csatorna). Ezenkívül minden hálózati kapcsoló közvetlen kapcsolatban áll az adott csatorna összes többi kapcsolójával. Ez a redundáns architektúra (2. ábra) lehetővé teszi az adatátvitel és -fogadás párhuzamos megvalósítását, biztosítva, hogy az adatkommunikáció elvesztése rendkívül valószínűtlen legyen [1], [4].

⁵ Modular Concept Unit – modulrendszerű berendezés.

⁶ Line Replaceable Unit – cserélhető egység, forgalmi karbantartás során cserélhető egység.

⁷ Application-Specific Integrated Circuit.

⁸ Peripheral Component Interconnect – processzorfüggetlen adatsín.



2. ábra
ARINC-664 kettős hálózati redundancia (a szerzők [13] alapján)

4. Ütközések elkerülése

Az ARINC 664-P7 protokoll az Ethernet hálózati technológia egy speciális változata, amelyet repüléstechnikai rendszerekhez fejlesztettek ki, hogy megfeleljen a valós idejű, magas megbízhatóságot és alacsony késleltetést igénylő adatkommunikációs követelményeknek. A hagyományos Ethernet-protokollal szemben az ARINC 664-P7 biztosítja az adatsomagok integritását, a késleltetés minimalizálását és az ütközések elkerülését [1], [4], [7].

A rendszer alapja a *virtuális kapcsolat* (VL⁹), amely egy meghatározott adatforrástól egy vagy több célrendszerhez juttat el adatsomagokat. Az Ethernet-keretformátumot úgy módosítják, hogy a forrás- és célcímet egy virtuáliskapcsolat-azonosító (VL ID) helyettesíti. A *Switch* (kapcsoló) egy konfigurációs táblában rögzíti az összes engedélyezett VL ID-t, ellenőrzi az adatsomagok forrását és tartalmát, majd azokat az előre meghatározott célrendszerekhez továbbítja [1], [4], [7].

Az ütközések elkerülése érdekében az ARINC 664-P7 teljes duplex hálózatként működik (3. ábra), ahol az adó (Tx) és vevő (Rx) adatok külön csavart érpáron haladnak. Az Rx- és Tx-pufferek FIFO¹⁰-memóriákat használnak, amelyek az adatsomagokat sorrendben tárolják és továbbítják. Habár ütközések és adatvesztés nem fordulhat elő, késleltetés (*Jitter*) lehetséges. A hálózattervezőknek gondoskodniuk kell arról, hogy az adatforgalom ne okozzon

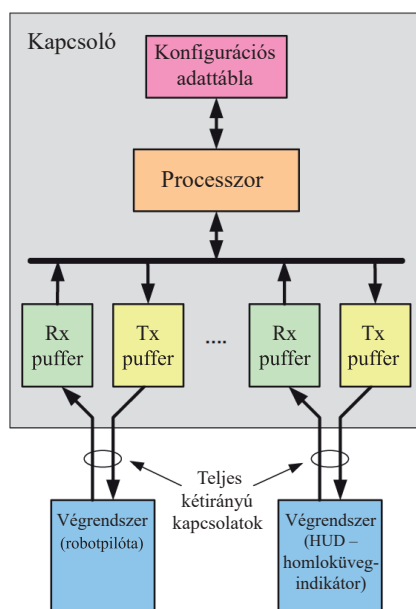
⁹ Virtual Link.

¹⁰ First-in, first-out – Az elsődleges memóriába csak korlátozott mennyiségű lapok férnek bele. Ha egy program olyan lapra hivatkozik, ami nincs benne a memóriában, akkor laphiba történik. A lapozási stratégiák célja, hogy a laphibák száma minimális legyen. A FIFO a lapozási stratégiák egyik fajtája. Az operációs rendszer a lapokat bejövételük szerinti sorrendben egy listában tárolja. Laphiba esetén a hiányzó lapot a rendszer a lista végére szúrja be [10].

túlsordulást a pufferben, amit a hálózati sávszélesség, késleltetés és *Jitter* szerződéses szabályozásával érnek el [1], [4], [7].

A hálózat adatforgalmát a *sávszélességi allokációs rés* (BAG¹¹) szabályozza, amely meghatározza, hogy egy adott VL milyen időközönként küldhet adatokat. A BAG-értékek jellemzően 1–128 ms között vannak, például egy 16 ms-os BAG 62,5 Hz-es frissítési ciklusnak felel meg. Ha nincs új adat, az adórendszer nem generál VL-üzenetet.

Az ARINC 664-P7 egy kettős redundáns hálózatot alkalmaz, ahol az adatcsomagok két független csatornán (A és B) egyszerre haladnak. A *Switch* CRC-ellenőrzéssel biztosítja az adat integritását, és a hibás csomagokat elveti. Az adatfogadó rendszer az első érvényes csomagot választja ki, biztosítva ezzel a hálózat rendelkezésre állását és megbízhatóságát [1], [4], [7].

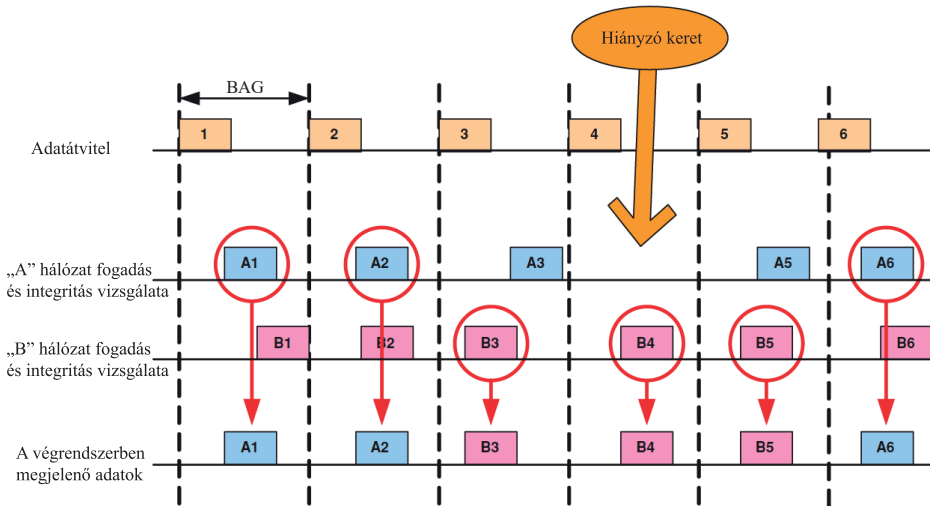


3. ábra
ARINC-664 hálózati kapcsoló (a szerzők [1] alapján)

5. Virtuális kapcsolatok

Az ARINC 664-P7 protokollban a hálózati adatokat *virtuális kapcsolatokkal* osztják fel, amelyek garantált sávszélességet, maximális késleltetést és *Jitter*t biztosítanak. A *switch* a VL-eket bemeneti és kimeneti portok között irányítja, és valós időben kezeli az adatcsomagokat, ellenőrizve, hogy azok mérete és sebessége ne lépje túl a konfigurációban meghatározott értékeket (4. ábra). A prioritásos VL-ek javítják az időkritikus üzenetek teljesítményét [1], [3], [4].

¹¹ Bandwidth Allocation Gap.



4. ábra
Redundanciakezelés a hálózatban (a szerzők [1] alapján)

A switch puffereket használ a bemeneti adatforgalom ütközésének elkerülésére és a kimeneti üzenetek rendszerezésére. A *forgalomszabályozás* és a *hibaelkülönítés* védi a hálózatot a szerződési feltételeket megsértő eszközöktől (problémák), amelyek adatvesztést okozhatnak [1], [3], [4].

A kettős kapcsolók és redundáns kommunikációs utak biztosítják a magas rendelkezésre állást, míg a CRC-alapú hibadetektálás garantálja az adatintegritást. Noha az ütközések elkerülhetők, az adatok feldolgozása késleltetést okozhat, amelyet a hálózattervezés, a multiplexálás és a switch működése befolyásol. A *jitter*, vagyis az üzenet érkezési időtartamának ingadozása szintén szabályozott, és minden VL megengedett maximális *jitter* értékét a konfigurációs táblázat rögzíti [1], [3], [4].

6. Protokoll

Az ARINC 664-P7 hálózat lehetővé teszi, hogy a repüléselektronikai alkalmazások UDP¹²- és IP¹³-protokollokon keresztül cseréljenek üzeneteket. Az UDP az olyan karbantartási protokollok alapja is, mint az SNMP¹⁴ és a TFTP¹⁵. Az adatok továbbítása a 2. rétegben, a MAC¹⁶-címek alapján történik, determinisztikus szabályokkal [2], [5], [8].

¹² User Datagram Protocol – felhasználói adatcsomag-protokoll.

¹³ Internet Protocol – internetprotokoll.

¹⁴ Simple Network Management Protocol – egyszerű hálózatkezelési protokoll.

¹⁵ Trivial File Transfer Protocol – triviális fájlátviteli szolgáltatás.

¹⁶ A számítógépes hálózatokban a kommunikációs közeghez való hozzáférés szabályozására használt módszerekre és protokollokra utal. Az OSI-modellben az adatkapcsolati réteg alrétege, és felelős az adatcsomagok megosztott hálózati közegen keresztüli továbbításáért [11].

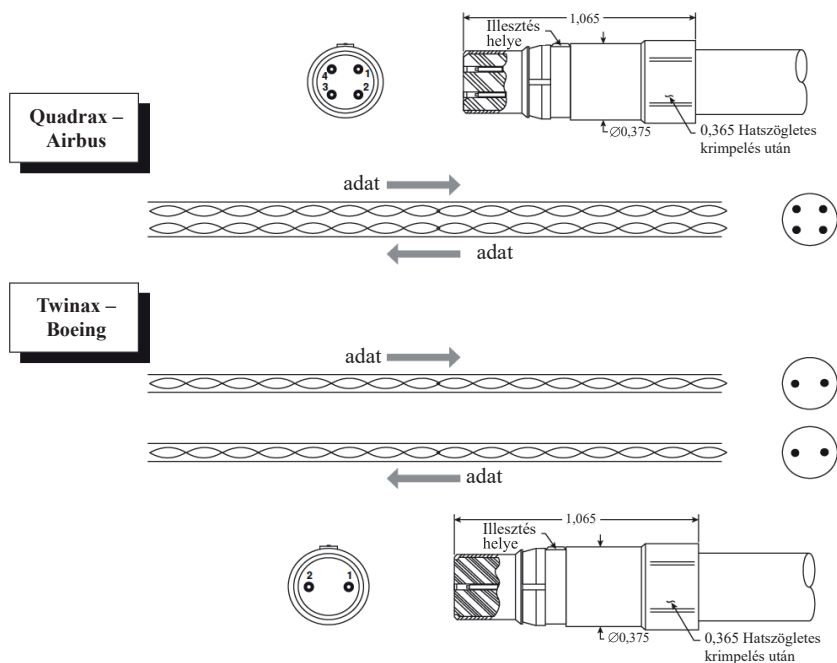
Az alkalmazások kommunikációs csatlakozókon (UDP-portokon) keresztül küldenek és fogadnak adatokat, amelyek kétféle típusba sorolhatók:

- mintavételi csatlakozók: egy kereten belül küldik az adatokat, amelyek felülírhatók vagy elveszhetnek. Főként rendszeresen ismétlődő, de aszinkron folyamatokhoz használják;
- sorba állító csatlakozók: több kereten keresztül küldenek adatokat, amelyek nem vesznek el, és sorrendben maradnak. Eseményvezérelt folyamatokhoz alkalmasak.

Az IP forráscíme mindig *unicast*, míg a célcím lehet *unicast* (egy alkalmazás) vagy *multicast* (több alkalmazás egy végrendszeren belül) [2], [5], [8].

7. Kábelezés

Az Airbus és a Boeing különböző telepítési stratégiákat alkalmaz a kábelezéshez és a csatlakozókhoz, amint az az 5. ábrán látható. Az Airbus a *quadrax* megközelítést alkalmazza (két csavart érpár egy közös külső pajzsban és egyetlen négyutas csatlakozó) 24 AWG¹⁷ vezeték-mérettel. A Boeing a *twinax* megközelítést alkalmazza (két csavart érpárú árnyékolt kábel és két kétutas csatlakozó), 22 AWG vezeték-mérettel. A Boeing megközelítése egyértelműen nehezebb, de fizikailag valószínűleg robusztusabb [1], [8], [9].



5. ábra
Különböző kábelezési formák (a szerzők [1] alapján)

¹⁷ American Wire Gauge – amerikai huzalszámozási szabvány.

8. Összefoglalás

Az ARINC 664-P7 hálózat az Ethernet-technológia repüléstechnikai változata, amelyet nagy megbízhatóságra és alacsony késleltetésre optimalizáltak. A rendszer fő előnyei közé tartozik a determinisztikus forgalommenedzsment, az adatcsomagok ütközésmentes átvitele és a kettős redundanciát biztosító csillagtopológia. A kommunikációt virtuális kapcsolatok szabályozzák, amelyek meghatározzák az adatátvitel sávszélességét, maximális késleltetését és prioritását. Az ARINC 664-P7 alkalmazása jelentős előrelépést jelent a hagyományos adatbuszokhoz képest, köszönhetően az Ethernet-alapú csomagkapcsolt rendszer rugalmasságának, széles körű protokolltámogatásának és költséghatékonyságának. A hálózat különösen fontos a kritikus repüléstechnikai rendszerek kommunikációs igényeinek kielégítésében, és várhatóan az új generációs repülőgépek szabványos megoldásává válik [1], [2], [3].

Felhasznált irodalom

- [1] I. Moir, A. Seabridge, M. Jukes, *Civil Avionics Systems*. Wiley, 2013. Online: <https://doi.org/10.1002/9781118536704>
- [2] ARINC 664, Avionics Interface Technologies. Online: https://aviftech.com/ait_product_category/arinc-664/
- [3] P. Heise, „Avionics Full Duplex Ethernet and the Time Sensitive Networking Standard,” 2015. Online: <https://www.ieee802.org/1/files/public/docs2015/TSN-Schneelee-AFDX-0515-v01.pdf>
- [4] AviftechVideos [@AviftechVideos], „ARINC664 Overview,” *YouTube*, 2012. június 27. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=AuSNKUHday0>
- [5] *IEEE Standard for Ethernet*. IEEE Standards Association. Online: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9844436>
- [6] „Ethernet keretek,” *Prog.hu*, 2000. október 30. Online: <https://prog.hu/cikkek/100265/ethernet-keretek>
- [7] W. Guangyun, Y. Bo, Y. Qinghua, „Key Technologies of ARINC664 Bus Testing,” in *2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, Qinhuangdao, 2015, pp. 92–97. Online: <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2015.27>
- [8] *AFDX Training October 2010 Full*. Online: <https://www.scribd.com/document/135645582/AFDX-Training-October-2010-Full>
- [9] C. R. Spitzer szerk., *Avionics. Development and Implementation*. Boca Raton, CRC Press, 2007.
- [10] How FIFO Memory Works in Data Buffering and Synchronization. Online: <https://heqingle.com/blog/fifo-memory-data-buffering-synchronization/>
- [11] *Media Access Control (MAC)*. Online: <https://multitech.com/iot-wiki/media-access-control-mac/>
- [12] *Az IEEE 802.3 szabvány és az ETHERNET*. Online: <https://www.szabilinux.hu/konyv/7fejezet/7fie8023.htm>
- [13] Dheeraj Punia, *AFDX®: A Time-Deterministic application of ARINC 664 part 7*. Online: www.logic-fruit.com/blog/arinc/afdx-a-time-deterministic-application-of-arinc-664-part-7/

AFDX, the Ethernet-based Data Network Used in Aviation

Our research focuses on ARINC 664-P7, an advanced deterministic data transmission network standard used in modern aviation systems, such as the latest aircraft from Airbus and Boeing. It is based on IEEE 802.3 Ethernet technology, enhanced with specialised protocol extensions to ensure high reliability and low latency. The system consists of three main components: end-systems (data transmission and reception), switches (routing of data packets), and virtual links (logical connections between end-systems). ARINC 664-P7 ensures data transmission integrity, collision-free communication, and redundancy, supporting real-time communication in aviation environments.

Keywords: Ethernet, data connection, avionics

Albert Csongor BSc-hallgató Nemzeti Közszołgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Állami légi közlekedési szak, katonai repülőmőszaki szakirány, avionika modul albert.csongor2016@gmail.com orcid.org/0009-0003-2503-4012	Csongor Albert BSc student Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training, State Aviation, Military Aviation Engineering, Avionics module albert.csongor2016@gmail.com orcid.org/0009-0003-2503-4012
Békési Bertold, PhD alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszołgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X	Bertold Békési, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X
Jámbor Krisztián mérnök tanár Nemzeti Közszołgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék jambor.krisztian@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-6406-0841	Krisztián Jámbor, MSc Teacher of Engineering Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems jambor.krisztian@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-6406-0841