

TERJÉK MIKLÓS*

AZ ÉJSZAKAI HARCKÉPESSÉGEK FONTOSSÁGA A MODERN HARCMEZŐN II. RÉSZ



1. ÁBRA. Egy amerikai katona teszteli az IVAS-rendszert 2023-ban (Forrás: DVIDS / Kade M. Bowers)

A z éjjellátó berendezések katonai alkalmazása alapvetővé vált a modern hadviselésben. Mára már nemcsak a különleges műveleti katonák eszköze az éjjellátó szemüveg, hanem minden műveleti katonának rendelkeznie kell ilyenekkel. A kétrészes tanulmány a különböző éjjellátó technológiák, így a képerősítő csöveken alapuló rendszerek, valamint a hőképkalkáló kamerák bemutatását tűzte ki célul, kiemelve azok harcászati előnyeit a harctéri helyzetismeret és a célazonosítás terén. A szerző az első részben a képerősítő rendszerű éjjellátó eszközök generációin keresztül mutatta be a technológia fejlődését, a második részben pedig a hőkamerák működését és fejlesztési irányait tárgyalja.

A HŐKAMERÁK TÖRTÉNETE

A hőkamerák képesek detektálni a tárgyak által kibocsátott infravörös sugárzást, majd vizuálisan megjeleníteni a hőmérséklet-különbségeket, lehetővé téve így az objektumok hőtérképének elkészítését. A működés alapja, hogy a hőkamerák detektorai az objektumok által kibocsátott infravörös sugárzást elektromos jellé alakítják. A legelterjedtebb detektortípusok közé tartoznak a BST (bárium-stroncium-titanát) alapú detektorok és a VOx (vanádium-oxid) mikrobolométerek. Az előbbieket ferroelektromos tulajdonságuk révén a hőmérséklet-változásra érzékenyek,

míg az utóbbiak az anyag elektromos ellenállásának változását használják a detektáláshoz. Az így kapott elektromos jeleket a kamera képfeldolgozó rendszere alakítja át hőképpé, ahol a különböző hőmérsékleti értékek színekben jelennek meg. Az 1950-es évek végén és az 1960-as években az amerikai Texas Instruments, a Hughes Aircraft és a Honeywell vállalatok fejlesztették ki az első hőérzékelő detektorokat. Az 1970-es években fejlesztették ki az első piroelektromos vidikon (infravörös fényre érzékeny vákuumcső) csövet, amelyet katonai hajótűzek kezelésénél használt a brit Királyi Haditengerészet. 1978-ban az amerikai Raytheon szabadalmaztatta a BST alapú infravörös detektorokat, amelyek hamarosan katonai alkalmazásokban is megjelentek. Az 1980-as évek végére az amerikai kormány támogatásával a Raytheon és a Honeywell jelentős fejlesztéseket hajtott végre mind a BST-, mind a VOx-technológiák terén. A kutatás-fejlesztési eredmények alapján az öbölháborút követően, a technológia polgári felhasználása is megindult, különösen a tűzoltóságok, a katasztrófavédelem és az ipari szereplők körében. [1]

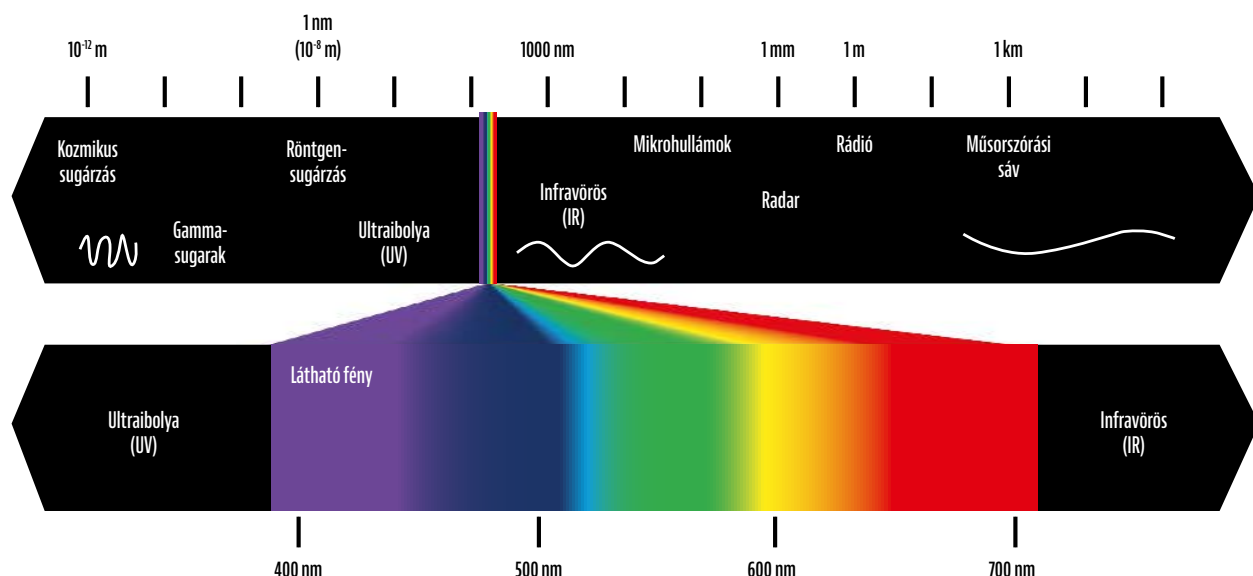
AZ ALAPOK

Az éjjellátó technológiák működésének átfogó megértéséhez szükséges a fény természetére és az emberi látás mechanizmusára vonatkozó alapvető ismeretek elsajátítása.

* Alezredes, NKE
Hadtudományi és
Honvédtisztképző Kar,
Katonai Felsővezető
Szakirányú
Továbbképzési Szak.
ORCID:
0000-0003-2705-0852



2. ÁBRA.
Az elektromágneses
sugárzás és a látható
fény spektruma [4]

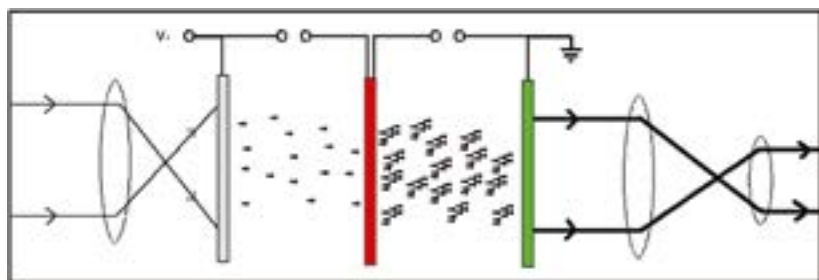


A fénytani megfogalmazás szerint: „Fénynek nevezük az elektromágneses spektrum látható tartományát. Fény keletkezéséről tehát akkor beszélhetünk, ha valamilyen módon ebbe a tartományba eső hullám keletkezik”. Tehát a fény nem más, mint elektromágneses sugárzás, amelynek teljes spektrumából az emberi szem számára csak egy szűk tartomány (2. ábra) érzékelhető. [2] A fényhullám energiájának mennyisége összefüggésben áll annak hullámhosszával: minél rövidebb a hullámhossz, annál nagyobb az energia. A látható fénytartományon belül az ibolya fény hordozza a legtöbb energiát, míg a vörös a legkevésbé. A látható fény és az elektromágneses sugárzás mikrohullámú része között helyezkedik el az infravörös (Infra Red – IR) tartomány. [3]

A különböző források eltérő értékeket használnak az infravörös sugárzás felosztása során. Itt az ISO 20473 által alkalmazott adatokat használok [5], amely szerint az infravörös sugárzás spektruma a 780 nm és 1 mm közötti hullámhossztartományba esik, és általánosan három fő kategóriára osztható. (2. ábra)

A termikus infravörös tartomány: minden olyan test, amelyik hőmérséklete magasabb az abszolút nulla foknál infravörös sugárzást bocsát ki magából. [6] A hőszugárzás az elektromágneses sugárzás infravörös spektrumából a 3–14 μm hullámhossztartományba esik. A különböző források ezt a tartományt termikus infravörös tartománynak is nevezik, és két fő részre osztják: közepes hullámhosszú infravörösre (Medium Wavelength Infrared – MWIR; sugárzás 3–5 μm között), valamint a hosszú hullámhosszú infravörösre (Long Wavelength Infrared – LWIR; sugárzás 8–14 μm között).

3. ÁBRA. Éjjellátó
berendezések
működése [11]



A képerősítő rendszerű éjjellátók működése szempontjából elengedhetetlen a környezeti maradékfény jelenléte – ennek hiányában, azaz fotonok nélkül, az éjjellátás fizikailag nem valósítható meg. Ezt a fényt a Nap, a Hold, a csillagok, valamint különféle mesterséges fényforrások – például közvilágítás, járművek fényszórói és fényreklámok – bocsátják ki, amelyek kiterjedt területek felett fénykúpokat, illetve világos fényudvart hoznak létre. A maradékfény azon fotonok összessége, amelyek éjjel és nappal, a fény sebességével haladva lefedik a környezetet. [7]

Az ember egyik legfontosabb érzékszerve a szem. A színes látás biztosítja az agy számára a külvilágból származó információk 90%-át, tehát ez alakítja legnagyobb mértékben a külvilágról alkotott képünket. A szem, amely egy összetett látószerv, két részből áll: az optikai rendszerből, amely fényingerek összegyűjtéséért és azok fókuszálásáért felel, valamint a neurális rendszerből, amely az optikai elemeken keresztüljutó ingerek előfeldolgozását és az agyba való továbbítását végzi. Az emberi szem leképezésben részt vevő szerkezetei szorosan együttműködve biztosítják a látást. A szaruhártya mögötti elülső csarnokot csarnokvíz tölti ki, amely fenntartja a szaruhártya alakját, valamint tápanyaggal látja el a szaruhártyát és a szemlencsét. Az elülső csarnokban helyezkedik el a pupilla is, amely a fény mennyiségét szabályozza simaizmok mozgása révén, ezzel alkalmazkodva a környezet fényssűrűségéhez. A pupilla mögött található szemlencse biztosítja az akkomodációt, vagyis a különböző távolságokra történő fókuszálást a görbületi sugár módosításával, amely a lencse szerkezetének és a sugártest izmainak köszönhető. A hátsó csarnokot az üvegtest tölti ki, amely strukturális stabilitást biztosít. A szem legbelső rétegét a retina alkotja, amely idegszövet, és kulcsszerepet játszik a képi információ feldolgozásában. [4] A retina kétféle sejtől épül fel, egyrészt csapokból, amelyek a színek megkülönböztetésére szolgálnak, másrészt pálcikákból, amelyek a fényerő érzékeléséért felelnek. Amikor a megvilágítás szintje csökken, kizárólag a pálcikák reagálnak, ezek ezerszer érzékenyebbek, mint a csapok; egy emberi szemben körülbelül 92–100 millió található belőlük. Ez megmagyarázza, hogy miért vált át a látás „fekete-fehér” módba. Emellett a tár-

gyak „elmosódottnak” tűnnek, mivel a pálcikák által küldött jelek továbbítása a látóideghez kevésbé hatékony. Alapvetően a természetes „éjjellátás” aktiválásához a pupilla kitágul, hogy több maradványfényt engedjen be, és ezáltal a pálcikák aktiválódjanak. Ez azonban a fényérzékelő sejtek mennyiségbeli korlátja miatt nem teszi lehetővé a hatékony éjszakai látást. [8]

A TECHNOLÓGIA

Az éjjellátó eszközök működését tekintve két, egymástól eltérő módszert különböztethetünk meg. Az egyik eljárás a képerősítés elvét alkalmazza – ezen az elven működnek az éjjellátó szemüvegek –, míg a másik a tárgyak által kibocsátott hőt érzékeli (infravörös hőkamera).

A képerősítő éjjellátó berendezések működése (3. ábra) összehasonlítható az emberi látásával, hiszen a fényt lencsék gyűjtik és továbbítják a különböző feldolgozó részegységekhez. A képerősítő csövek egy objektívlencsét használnak a rendelkezésre álló fény (fotonok) – beleértve az infravörös spektrumtartományból származó fény – összegyűjtésére. A lencse a fényt a negatív feszültségű fotokatódra (szürke) irányítja, amely a belépő fotonok hatására elektronokat bocsát ki, ezek a magasabb feszültségű mikroszatornás erősítőlemezen keresztül haladva (piros) felgyorsulnak. Minden egyes elektron több másik elektron kibocsátását idézi elő a mikroszatornás lemezről (kaskádhatás). Az elektronok a foszfor képernyőbe (zöld) csapódnak, arra kényszerítve a foszfort, hogy fotonokat bocsásson ki, amelyek az okulárlencsén keresztül jutnak a megfigyelő szemébe. [11]

Az I²-eszközök többféle foszforképernyővel készülnek, ezek közül a leggyakoribbak: P22 (zöld), P43 (sárgászöld) és P45 (fehér). A P22 típus a legelterjedtebb a katonai felhasználás eszközeinél a szélesebb látható spektrum miatt. A P43 képernyő szűkebb látható spektrummal rendelkezik, és a gyors képeltűnési ideje (decay time) miatt vált népszerűvé a repülőszemélyzetek körében. A P45 képernyő hasonló képeltűnési idővel rendelkezik, mint a P43, és kiváló felismerési képességet biztosít. A P45 által megjelenített kép fekete-fehér, ami csökkenti a szem fáradását, gyorsabb felismerést tesz lehetővé (különösen homokos/sziklás terepen) és jobb árnyalat-megkülönböztetést biztosít, mint a hagyományos zöld kijelzők. [7] (4. ábra)

A hőkamera-technológia alapvetően eltér más éjjellátó eszközökétől. Míg a képerősítők a 750–1100 nm közötti közeli infravörös (NIR) hullámhossz-tartományra épülnek, addig a termikus rendszerek a célobjektum és környezete közötti hőmérséklet-különbséget érzékelik a közepes (MWIR:



Zöld foszfor



Fehér foszfor

3–5 μm) és hosszúhullámú (LWIR: 8–14 μm) infravörös sávban. Működési rendszerük szerint három típust különböztethetünk meg: hődetektoros vidikon rendszerű, letapogató, valamint mátrixdetektoros (Focal Plane Array – FPA) hőkamerákat. A vidikon csöves és a letapogató (szkenelő) hőkamerák mára elavultnak számítanak, ezért működésüket itt nem ismertetem. A mátrixdetektoros kamerákban a képerősítő eszközökben alkalmazott fotokatódos képalkotó csövek helyett a hőképet egy rácsszerűen elrendezett érzékelőelemeket tartalmazó FPA-egység alakítja át. Ezen hőkamerák a használt érzékelők típusai szerint két csoportba sorolhatók: termikus érzékelők és fotondetektorok. A termikus érzékelők az infrasugárzás, azaz egy elektromágneses hullám energiája hatására felmelegsznek, és ennek következtében valamely fizikai (villamos) paraméterük megváltozik, amiből a képalkotáshoz szükséges villamos jel keletkezik. Hűtésük nem szükséges, mivel érzékelőik környezeti hőmérsékleten is működőképesek. Bár ezek a rendszerek alacsonyabb érzékenységgel rendelkeznek, előnyeik közé tartozik az alacsonyabb költség, a kisebb méret, a gyorsabb üzembe helyezés és a csendesebb működés. Az utóbbi évek technológiai fejlődésének köszönhetően a nem hűtött rendszerek váltak a legelterjedtebbé. A másik típushoz a fotondetektorok tartoznak, melyek a fotonok számával arányos villamos jelet adnak, de működésükhöz rendkívül alacsony hőmérsékletre történő lehűtésük szükséges. Ehhez olyan technológiát alkalmaznak, amely a detektor hőmérsékletét jelentősen – akár 200 Kelvinig (-100°F ; $-73,15^\circ\text{C}$) – képes csökkenteni. A hűtés célja, hogy a detektor hőmérséklete alacsonyabb legyen, mint a megfigyelt objektumoké, ezáltal növelve az érzékelés érzékenységét. A hűtéshez többféle technológia áll rendelkezésre, például cseppfolyósított gázokon alapuló kriogén rendszerek, termoelektromos Peltier-elemek,

4. ÁBRA. A zöld- és fehérfoszfor-kijelzők közötti különbség (Forrás: Night Vision Experts)

1. TÁBLÁZAT. Az infravörös sugárzás spektruma [5]

Sugárzás megnevezése	Rövid jelölés		Hullámhossz λ [μm]	Frekvencia ν [THz]	Hullámszám σ [cm ⁻¹]	Fotonenergia Q_e [eV]
Közeli infravörös	IR-A	NIR*	0,78 – 1,4	385 – 215	13 000 – 7000	1,6 – 0,9
	IR-B		1,4 – 3	215 – 100	7000 – 3300	0,9 – 0,4
Közepes infravörös	IR-C	MIR**	3 – 50	100 – 6	3300 – 200	0,4 – 0,025
Távoli infravörös		FIR***	50 – 1000	6 – 0,3	200 – 10	0,025 – 0,001

* Near-infrared (közeli infravörös sugárzás); ** Medium infrared (közepes infravörös sugárzás); *** Far infrared (távoli infravörös sugárzás).

valamint mechanikus Stirling-hűtők. A Peltier-hűtők előnye a kis tömeg és a karbantartásmentes működés, ugyanakkor magas energiaigényük miatt ritkán alkalmazzák őket. A Stirling-hűtők ciklikusan sűrítik és tágítják a gázt, ezáltal biztosítva az állandó hőmérséklet szabályozást. Ezek a rendszerek általában vákuumzárt burkolatban helyezkednek el, amely megakadályozza a külső hőhatások befolyását. A tipikus üzemi hőmérsékletük 77 K vagy annál alacsonyabb. A hűtött rendszerek előnye, hogy kiváló képminőséget biztosítanak, képesek multispektrális és nagy sebességű IR-képalkotásra, továbbá kiváló érzékenységgel rendelkeznek. Ugyanakkor hátrányaik közé tartozik magas költségük, zajos működésük, a 3–4 perces felfutási idő a működési hőmérséklet eléréséhez, valamint a hűtőrendszerek korlátozott élettartama és nagy karbantartási igénye. [7][9]

A LEGÚJABB FEJLESZTÉSEK

Az éjjellátó technológia területén napjainkban több jelentős fejlesztés is zajlik, amelyek célja a katonák harctéri hatékonyságának növelése. Az innovációk között kiemelkednek a fúziós képalkotó rendszerek, amelyek a legújabb generációs fehérfoszforos éjjellátó csöveket és a hőképalakító technológiát egyesítik valós idejű információmegjelenítéssel és baráti-azonosítással. Ilyen az amerikai hadsereg által jelenleg fejlesztett IVAS (Integrated Visual Augmentation System: integrált vizuális támogató rendszer) (1. ábra), ami egy sisakra szerelhető, kiterjesztett valóságot (Augmented Reality) alkalmazó eszköz, amely a vizuális érzékelést navigációs és valós idejű harcászati információkkal egészíti ki, beleértve a baráti és ellenséges erők helyzetét. Emellett a multispektrális képalkotási technológia – különböző hullámhosszokon történő érzékeléssel – fokozza a látási képességeket, zavaró környezeti tényezők (pl. köd, füst) jelenlétében. Az IVAS rendkívüli potenciállal rendelkezik, és az éjszakai harcképességet magasabb szintre emelheti. Azonban a Microsoft által ere-

detileg a HoloLens 2 civil változatára épített IVAS-rendszer számos technikai és ergonómiai hiányossággal küzd, beleértve a megbízhatósági gondokat és a katonák által jelentett fizikai kellemetlenségeket, mint például fejfájás és hányinger. Ezek a problémák késedelmekhez és a program újragondolásához vezettek. 2025 februárjában a Microsoft bejelentette, hogy az IVAS-program vezetését átadja az Anduril Industries-nek, egy védelmi technológiákkal foglalkozó vállalatnak. Továbbá az amerikai hadsereg elindította az „IVAS Next” nevű kezdeményezést, amelynek célja a rendszer továbbfejlesztése és a korábbi problémák orvoslása. A program keretében az iparági szereplőknek lehetőségük van prototípusok bemutatására és javaslatok benyújtására.

A fejlesztési irányvonalak közé tartozik továbbá a rendszerek miniaturizálása és ergonómiai optimalizálása, amely a katonai eszközök könnyebb viselhetőségét és hosszabb távú alkalmazhatóságát szolgálja. Az egyik legújabb trend az éjjellátó eszközök mesterséges intelligenciával (MI) és gépi tanulással való integrációja. Az MI-alapú rendszerek automatikusan érzékelik és kiemelik a potenciális fenyegetéseket, ezáltal csökkentik a felhasználók mentális terhelését és gyorsítják a döntéshozatalt. Ezen eszközök valós időben alkalmazkodnak a változó környezethez, optimalizálva a képminőséget. A jövő kilátásai különösen ígéretesek: a kvantumpontok, alacsonyfény-érzékelők és fejlett optikai rendszerek forradalmasíthatják az iparágat, eddig nem látott képtisztaságot és teljesítményt kínálva. Az éjjellátás kombinálása más új technológiákkal – például autonóm rendszerekkel vagy drónokkal – új távlatokat nyithat a katonai és civil felhasználásban egyaránt. Az éjjellátás képessége hamarosan minden eddiginél hozzáférhetőbbé és sokoldalúbbá válhat. [10]

KÖVETKEZTETÉS

Az éjszakai idő harctevékenységek céljából történő kihasználása mára már minden modern haderő számára elengedhetetlenül szükségessé vált a következő okok miatt. Egyrészt az éjjellátó eszközök használatával kialakított éjszakai harcképesség biztosíthatja azt a pluszt, ami az azt professzionális módon alkalmazó és lehetőségeit kihasználó hadsereg számára, egy ezen a téren szerényebb képességekkel rendelkező ellenféllel szemben, a siker kulcsa lehet. Illetve a hasonló módon „éjjellátó” ellenség esetén az esélyeket kiegyenlítheti. Az éjjellátó eszközök jelentős fejlődésen mentek keresztül a kezdeti, robusztus berendezésektől napjaink sokoldalú, fejlett technológiát képviselő megoldásáig. Az olyan technológiai újítások, mint a hőképalakítás, a digitális képalkotás, a multispektrális érzékelés és a mesterséges intelligencia integrációja, forradalmasítják az éjjellátás lehetőségeit. Ezen éjszakai képességek kombinációja célmegjelölő és kommunikációs eszközökkel egy komplex rendszerbe foglalva lehetővé teszi a harcmező átfogóbb értelmezését, a gyorsabb döntéshozatalt és az információs fölény megszerzését. Ha egy hadsereg nem tart lépést ezen a területen, súlyos hátrányba kerülhet. A korszerű éjjellátó rendszerek a lehető leg szélesebb körben történő rendszeresítése elengedhetetlen az erőfölény fenntartásához. ■

HIVATKOZÁSOK

- [1] Gromicko, Nick: The History of Infrared Thermography. <https://www.nachi.org/history-ir.htm> (Letöltve: 2025.05.10.)
- [2] Macsuga János et al.: Fénytan, színdinamika. Nemzeti Tankönyvkiadó, Miskolc, 2011, 21.
- [3] Haque, Mohd Junedul – Muntjir, Mohd: Night Vision Technology: An Overview. International Journal of Computer Applications, 2017, 37–42. <https://doi.org/10.5120/ijca2017914562>
- [4] Ábrahám György et al.: Jármű optika. BME MOGI, Budapest, 2014. https://www.mogi.bme.hu/TAMOP/jamu_optika/ch02.html (Letöltve: 2025.04.26.)
- [5] ISO 20473, Optics and photonics – Spectral bands. International Standard.
- [6] Makkay Imre: Elektrooptikai eszközök légijárművek felderítésére. Repüléstudományi közlemények, 2014/3, 15–26. https://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2014_3/2014-3-02-0177_Makkay_Imre.pdf (Letöltve: 2025.05.04.)
- [7] Night Vision Technologies Handbook. U.S. Department of Homeland Security, 2013, 10. https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/NV-Tech-HB_1013-508.pdf (Letöltve: 2025.05.09.)
- [8] Tagged, Jerome: What is Night Vision? AresMaxima, 2018.09.17. <https://en.aresmaxima.com/2018/09/17/la-vision-nocturne-cest-quoi/> (Letöltve: 2025.05.02.)
- [9] Lengyel Gabriella – Horváth Áron: Hőkamerákról bővebben. Solvergroup, 2018.10.10. <https://solvergroup.hu/sajtoszoba/hokamerakrol-bovebben> (Letöltve: 2025.05.12.)
- [10] James, Nathaniel: Illuminating the Dark: Exploring the Evolution of Night Vision Devices. Verified Market Reports, 2025. <https://www.verifiedmarketreports.com/blog/top-7-trends-in-night-vision-devices> (Letöltve: 2025.05.14.)
- [11] Night Vision Device. E Scholarly Community Encyclopedia, <https://encyclopedia.pub/entry/29146> (Letöltve: 2025.04.25.)