

Gulyás Attila¹

Egyes modulációs eljárások vizsgálata az ötödik generációs vezeték nélküli hálózatok műszaki követelményeinek támogatására

Review of Some Modulation Methods in Support of the Technical Requirements of Fifth Generation Wireless Networks

Az ötödik generációs vezeték nélküli hálózatok fejlesztésének adventje időszakában érdemes megvizsgálni az IMT-2020 ajánlásaiban megfogalmazott hálózati paraméterek elérését lehetővé tevő modulációs eljárásokat az átfogó hálózati megközelítés érdekében. E tudományos közlemény a jelenlegi szabványok és ajánlások alapján üzemben lévő QAM-eljárásokat veszi górcső alá annak érdekében, hogy jobban feldolgozhatóvá váljanak az 5G-hálózatok alapját képező modulációs megoldások a magas adatsebesség, a nagyobb sávszélesség és az optimalizált teljesítményfelvétel biztosítására.

Kulcsszavak: IMT-2020, 5GN, QAM

In the advent of the development of fifth-generation wired and wireless networks, it is worth examining the achievement of the network parameters set out in the IMT-2020 recommendations, enabling modulation procedures for a comprehensive network approach. This scientific paper examines the existing QAM procedures run by current standards and recommendations in order to make the modulation solutions underlying the 5G networks plannable, to ensure high data rates, higher bandwidth, and optimised power consumption.

Keywords: IMT-2020, 5GN, QAM

¹ Többnemzeti Hadosztály Parancsnokság (HQ MND-C), ezredes, Infokommunikációs főnök, e-mail: attila.gulyas@mil.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5774-5757>

1. Bevezetés

A társadalmi igény a nagy sáv szélességű, multimédiás tartalomletöltést és az ipari technológiai változásokat is támogatni képes vezeték nélküli infokommunikációs hálózatok kialakítására új lendületet kapott a 2019-ben kialakult koronavírus-pandémia miatt elrendelt otthoni munkavégzési szabályzók bevezetése és a lakóhelyelhagyást korlátozó intézkedések miatt. E megnövekedett adatátviteli igény szintnek a kielégítésére a műszaki oldalról adható válaszok egyike lehet az újabb, rendszertechnikailag a korábbi vezeték nélküli adatátviteli hálózatokat integráló, ugyanakkor az állami, a polgári kereskedelmi ajánlásokban megfogalmazott rendszerkövetelmények teljesítésére hivatott hálózatok szabványosítása, illetve e folyamatok felgyorsítása. Az ötödik generációs (*Fifth Generation Networking*, 5GN) vezeték nélküli ajánlásokban (*International Mobile Telecommunications – Advanced 4G LTE-A és IMT-2020 5G*) rögzítették azokat a rendszerparamétereket, amelyeknek teljesülniük kell annak érdekében, hogy ezeket a megnövekedett igényeket kielégítsék.

Az ötödik generációs hálózati követelmények vizsgálatához objektív forrás a Nemzetközi Távközlési Egyesület Infokommunikációs Szakcsoportjának (ITU-R) hálózatspecifikáció-összefoglalója; e követelményeket a nemzetközi telekommunikációs fejlesztések irányának kijelölése érdekében fogalmazták meg,² kutatási-fejlesztési célokra létrehozott polgári vállalkozásokkal támogatva.³ Az IMT-2020 a következő ajánlásokat hangsúlyozza az 5GN kialakítása érdekében. Először is, az új hálózati szabványnak integrálnia kell a már meglévő, üzemelő adatátviteli rendszerek szabványait (GSM/GPRS/EDGE/UMTS/LTE-A/IEEE802.11 szabványcsalád), azok műszaki paramétereinek többszörözésével. Másodsorban az új, a kitűzött hálózat-specifikus célok elérése érdekében az adatátviteli sebesség növelését a gyakorlatban mérhető 10-50 Mb/sec-ről néhányszor 10 Gb/sec értékre, a jelkésleltetési időintervallumot 70-50 ms-ről 10-1 ms-re (vagy annál még kisebbre) indokolt változtatni. Továbbá a hálózati végfelhasználói eszközök (*User Equipment*, UE) számát az LTE-A hálózatokhoz képest – a felhasználói igények kielégítésére, az adott cellás lefedettség keretein belül – százsorozni indokolt, az akkumulátorok üzemidőhosszában legalább tízszeres javulást kell (javasolt) elérni. E rendszerparaméterek teljesülése képezheti az alapját, illetve támogatja a Tárgyak Internete (IoT) és a Gép-Gép-összekapcsolások, a szenzorhálózatok integrációja,⁴ az okoseszközök (okosházak, önzetű/autonóm munkagépek és gépjárművek, funkcionális ipari robotok) adatcseréinek felgyorsítását is.⁵

A témához köthető tudományos közlemények eredményei, a létező szabványok és műszaki leírások egy része a digitalizált információnak az adatátviteli csatornák kialakítását követő átvitelével, csatornaképzési és csatornalyalábolási eljárások feldolgozásaival foglalkoznak. E kutatásokhoz szervesen kapcsolódik, illeszkedik annak vizsgálata, milyen módon alakítjuk át az analóg információinkat az optimális

² ITU-R: Recommendation ITU-R M.2021-3 (*IMT-Advanced*). January 2018. 4–23.

³ ITU-R: Recommendation ITU-R M.2021-4 (*IMT-Advanced*). November 2019. 16–23.

⁴ Károly Krisztián: LoRaWAN-technológia felhasználási lehetőségei a katonai alkalmazások tükrében. *Hadmérnök*, 14. (2019), 3. 101–111.

⁵ Károly Krisztián: Szenzorhálózatok adatainak integrálási lehetőségei a perspektivikus erőkövetési rendszerekbe, különös tekintettel az egyéni egészségügyi adatokra. *Hadmérnök*, 14. (2019), 1. 260–270.

csatornaátvitel támogatására. A modulációs eljárások tehát ugyanolyan fontossággal jelentkeznek az 5GN kialakítása esetében, mint a digitális-analóg adatátviteli csatornák összeállítása.

Ebben a tudományos közleményben összefoglalom a már alkalmazásban levő egyes modulációs eljárásokat annak érdekében, hogy áttekintést nyújtsak az 5GN rendszerparamétereinek teljesebb megértéséhez.

2. Adatátviteli megoldások a rendszerparaméterek kialakítására

Ahogy a bevezetésben rámutattam, az 5GN rendszerparaméterek megközelítéséhez alapvetésként tekinthetünk a már üzemben lévő LTE-A és az IEEE 802.11 szabványcsaládban alkalmazott digitális modulációs eljárások alkalmazására, azok továbbfejlesztésének igényével. Mindezt annak érdekében, hogy az információátvitelre a már jelenleg is zsúfolt rádiófrekvenciás csatornában a legkevesebb bit/szimbólumtvesztéssel üzemelő, a mindenkori elektromágneses környezetváltozásra adaptív módon reagáló hálózatokat képezzünk. A szoftverfejlesztési alapokon nyugvó kognitív hálózatok (*Software Defined Network SDN*) kialakítása tehát alapvető rendszerkövetelmény.

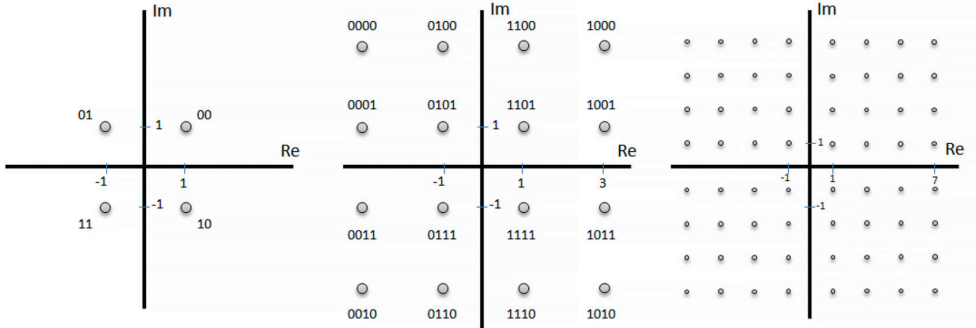
Általános megközelítés alapján a digitális modulációs eljárások jellemezhetők az adatbitek/adatszimbólumok meghatározott időegység alatt továbbított mennyiségével és az átviteli csatornához illesztettség szintjével (sávszélesség, a csatornateljesítmény értéke és annak hatékonysága, zavarállóság stb.). Hálózattervező mérnökök alapvető tevékenysége megtalálni – a tervezési eljárások folyamán – az egyensúlyt a legkisebb komputációs igényű modulációs eljárás kiválasztása és a csatorna sávszélességének tervezése között a csatornateljesítmény optimumának az elérése céljából. Kijelenthető, hogy ezen adatátviteli optimum kialakítása jelentős, az egyik vagy másik adatösszetevő változtatására vonatkozó kompromisszumokat igényel.

Az alapokról indulva, az információ rádiófrekvenciás csatornán való átvitelére a legegyszerűbb megoldás lehet a bitek egyesével, egymás után történő továbbítása a meghatározott frekvencián (csatornán): az 1 bitnyi információt továbbítjuk, rendszerspecifikációtól függően várunk a fogadó visszajelzésére az átvitel sikerességéről (szinkron üzemmódban), majd ennek függvényében újraküldjük az adott biteket, vagy folytatódik a kisugárzás/továbbítás a következő bittel. Mindezt addig folytatjuk, amíg a bitekre bontott információt teljes mennyiségében átvittük (és visszaigazolták). Kiváló példa lehet az ilyen adatátvitelre az amplitúdó-billentyűzés (*Amplitude Shift Keying, ASK*) gyakorlati megvalósítása.

Jelentős előrelépés a biteknek előre definiált paraméterek alapján történő csoportosítását követő továbbítása. Az így kialakított bitscsoportokat, a szimbólumokat az adott csatornán egymást követően továbbítjuk. Példa erre az adatátviteli eljárásrendre a kvadratúra fázisbillentyűzés (*Quadrature Phase Shift Keying, QPSK*) és a kvadratúra amplitúdó moduláció (QAM). E fenti modulációs eljárásokból fejlesztették az Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) eljárást, amelynek alkalmazásakor a szimbólumokat, szimbólumcsoportokat többszörös átviteli csatornán (alcsatornákon), közel azonos időben továbbítják. Az OFDM ortogonális összetevőinek előállítását digitális modulációs eljárások végzik el a szinuszos jelek valamely (amplitúdó, frekvencia, fázis)

összetevőjének módosításával. A gyakorlatban a leginkább elterjedt műszaki megoldások a már hivatkozott ASK és QAM, amelyek közül leginkább ez utóbbi a használatos. A QAM-eljárás keretében az információátvitelre a vivők/alvivők fázisát és amplitúdóját változtatjuk, azaz a csatornában továbbítandó jelet szinuszos (a QAM szinuszos összetevője – In-Phase) és koszinuszos (a QAM koszinuszos összetevője – Quadrature Phase) taggal szorozzuk fel (biztosítva az ortogonalitást).⁶

A komplex számok síkján e fázis- és amplitúdószorzás tehát komplex (valós és imaginárius összetevőjű) számot eredményez, amely – egy lehetséges ábrázolásmód szerint – a konstellációs diagramban értelmezhető (1. ábra).



1. ábra

QAM (általános) konstellációs diagramjai

Forrás: Suketu Naik: *EE4900/EE6720 Digital Communications Lecture 9, Digital modulation-demodulation Part 3. Tutorial presentation, Weber State University, Slide No. 9.*

Az egyszerűsített témafeldolgozás érdekében, a 1. ábra bal oldalán tanulmányozható 4QAM (más megnevezésben QPSK) a QAM különleges változata, ahol a rögzített jelamplitúdó (értéke 1) négyféle fázisállapottal jellemezhető (45-135-225-315 fokos fázisok), azaz az egységnyi amplitúdójú impulzusunk egy-egy fázisváltozása 2-2 bit információt továbbíthat.⁷

A magasabb adatátviteli sebesség (adatsűrűség) eléréséhez komplexebb QAM indokolt (1. ábra középső és jobb oldali diagramjai), ugyanakkor a QAM helyes választásakor figyelemmel kell lenni a modulációs komplexitásból származtatható jeltovábbítási és a visszaalakítási kihívásokra is. Ezzel együtt is, vélhetően a QAM lesz/lehet – elsősorban az ortogonális eljárások alkalmazása esetében – az a modulációs eljárás,⁸ amely perspektivikusan megvalósíthatja az IMT-2020 ajánlásokban rögzített rendszerparamétereket a követelmények vonatkozásában.⁹ A bit/szimbólumok száma

⁶ *What is QAM?* Electronics Notes.

⁷ Robert Keim: *Understanding Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Modulation.* EETech Media LLC, 2016.

⁸ Mádi Gábor: *LTE uplink rádiós interfész szimulációs vizsgálata.* Szakdolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos és Informatikai Kar, Híradástechnikai Tanszék, 2009. 25.

⁹ Julie Sheridan – Chris Kocot: *Quadrature Amplitude Modulation.* Optical Fiber Telecommunications (Sixth edition) 2013.

és a komplex modulációs mód összefüggése az 1. táblázatba szervezett összefüggésekből tanulmányozható.

1. táblázat

Az alkalmazott modulációs módok áttekintése

Forrás: John Houghton: *Calculating QAM Bandwidth Gains*. NeoPhotonics Review, 12 December 2017. 15.

modulációs mód	bitek száma	bit/szimbólum	példa
ON-OFF keying (ASK)	2^1	1	0
QPSK	2^2	2	01
16QAM	2^3	4	0101
32QAM	2^4	5	01010
64QAM	2^5	6	010101
128QAM	2^6	7	0101010
256QAM	2^7	8	01010101
512QAM	2^8	9	010101010
1024QAM	2^9	10	0101010101

Általánosságban kijelenthető, hogy magasabb szintű moduláció alkalmazásával – azonos csatornaparaméterek mellett – nő a csatorna kihasználási szintje, ezzel együtt az adatátviteli sebesség növelhető.¹⁰ A továbbiakban azt vizsgálom, magasabbrendű QAM alkalmazásával hogyan növekszik a modulációs komplexitás, illetve arra keresek választ, hol lehet meghúzni a határvonalat a komplexebb moduláció és a számítási igények optimuma között, az IMT-2020 ajánlásban rögzített 5GN-rendszerparaméterek elérésére.

3. Quadratura amplitúdómoduláció az 5GN rendszerparaméterek támogatására

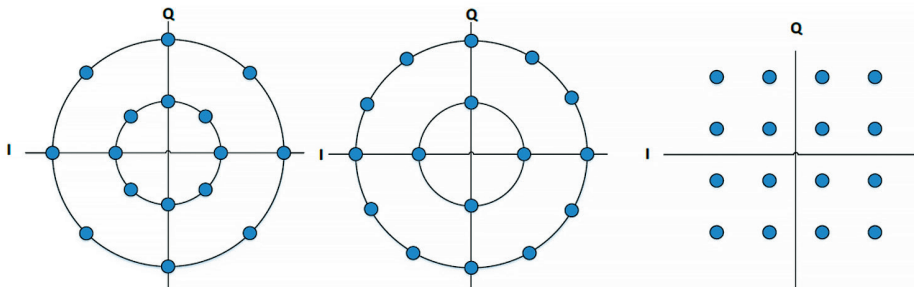
Az előző fejezetben már részletezett ASK és PSK a tudományos hivatkozások felsorolásában mint lineáris moduláció szerepelnek, mivel viszonylagos egyszerűségükből adódóan teljesítik a szuperpozíció és a skálázhatóság követelményeit,¹¹ számítási igényük alacsony (jelelőállítás adó/szoftveroldali követelményei egyszerűbben teljesíthetők). Előnyös tulajdonságaik teszik lehetővé az egyre nagyobb részarányú alkalmazásukat a vezeték nélküli átviteli rendszerekben is. A QAM ötvözi az alacsony számítási igényt a csatornahatékonyságra való törekvés és a csatornateljesítmény optimumával. Előretekintve, M -szeres QAM alkalmazása további előnnyel járhat

¹⁰ Károly Krisztián: Globális Műholdas Navigációs Rendszerek alkalmazási lehetőségei katonai és polgári célú flotta- és erőkötési rendszerekben (1.). *Honvédségi Szemle*, 146. (2018), 1. 83–97.

¹¹ Thomas A. Courtade – Jiadong Wang – Richard D. Wesel: *Superposition Coding to Support Multiple Streams, Priorities and Channel Capabilities in the Context of GMSK*. Military Communications Conference, Department of Electrical Engineering, University of California, Los Angeles, 2011. 605.

az átviendő szimbólumok nagy mennyiségének egységnyi idő alatti továbbításának esetében, hiszen az 5G-rendszerekben a nagy adatátviteli sebesség (Gbit/s) igénye folyamatosan jelen van. Ugyanakkor a csatornateljesítmény egy rögzített Bit-Error-Ratio (BER) értékhez illesztve igényli az úgynevezett „adaptív moduláció” tervezését (figyelemmel a UE-k csatornateljesítményére, a rendelkezésre álló csatornák sávszélességére, a Signal-to-Noise-Ratio-ra [SNR] az optimalizált Quality of Service [QoS] elérése érdekében). Ebben az esetben a jelelőállító szoftver kognitív módon tervezi és alakítja ki a csatornához optimalizált modulációs módot. Az adaptív modulációs módok értelmezéséhez – a QAM fejlesztésének kronológiáját követve – a következőkben áttekintem a csillag-QAM (Star-QAM), a kereszt-QAM (XQAM) és a hexagonális (hatszögletű) QAM (HQAM) modulációs módokat a jelkialakítás tükrében. Az elnevezések a konstellációk kétdimenziós leképezéseire, alakfelvételeire utalnak.

Az 1950-es években a QAM a digitális amplitúdó- és fázismodulációs eljárások egyfajta kombinált alkalmazásaként jelent meg,¹² amelyet korán kiegészítettek amerikai kutatók révén (1-es és 2-es típusú QAM: Square QAM, SQAM).¹³ Alapelve, hogy a digitális impulzussorozat amplitúdóit és fázisszögeit azonos időben változtatjuk, a meghatározott amplitúdójú impulzusnak előre definiált fázisszögértéket jelölve ki. A moduláció (ábrázolás szempontjából egyszerűsített) cirkuláris kialakításának hatékonysága növelhető, ha úgynevezett konstellációs (vízszintes és függőleges tengelyek kvadránsaiban definiálható) pontokat jelölünk ki az ábrázolás koncentrikus köreire, ahol kevesebb pontot definiálunk az origóhoz közeli konstellációkban, míg több szegmenst jelölünk meg az origótól távolabb eső fázispontokon. Innen tovább lépve, amerikai kutatók 1962-ben négyszögletes konstellációs ábrában definiálták¹⁴ a magasabbrendű QAM (3. típusú SQAM) egy típusát. E három felosztást a 2. ábrán szemléltetem.



2. ábra

QAM impulzusértékek elhelyezkedése az 1–3. típusok esetében

Forrás: Praveen Kumar Singya et alii: *A Survey on Design and Performance of High-Order QAM Constellations*. 2019. 4–6.

¹² C. Cahn: Combined digital phase and amplitude modulation communication systems. *IEEE Transactions on Communications*, 8. (1960), 3. 150–155.

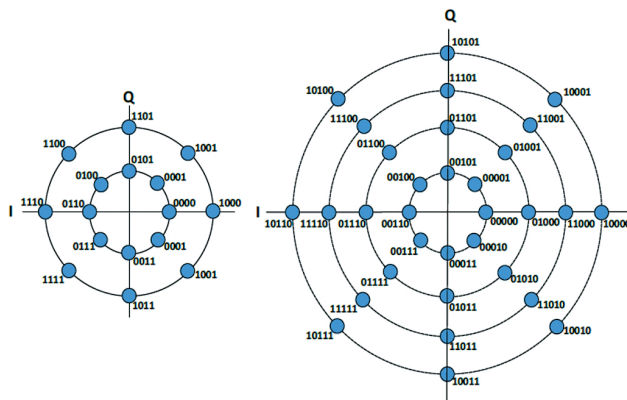
¹³ J. Hancock – R. Lucky: Performance of Combined Amplitude and Phase-modulated Communication Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 8. (1960), 4. 232–237.

¹⁴ C. Campopiano – B. Glazer: A Coherent Digital Amplitude and Phase Modulation Scheme. *IEEE Transactions on Communications*, 10. (1962), 1. 90–95.

A Bell-laboratórium kutatóinak további kutatási eredményeiképpen¹⁵ 1971-ben ajánlották a kettő vagy négy amplitúdó állapothoz tervezett négy vagy nyolc fázispozíciós elrendezéseket, majd Simon és Smith tettek javaslatot a kétdimenziós (2D – In-Phase and Quadrature Phase) struktúrájú HQAM-re a jelátvitel spektrális hatékonyságának növelésére.

SQAM-et jelentős mértékben alkalmaznak a vezeték nélküli távközlési rendszerek esetében, ahol – figyelembe véve Cahn és Lucky kutatási eredményeit az 1-es és 2-es típusú QAM-re vonatkoztatva – kisebb a bithibák valószínűsége az értelmezésük alapján szinte tökéletes köralakban kialakított amplitúdó- és fázispontokon (M= 4-16-64-256-1024-4096). M-szeres QAM jóval kevesebb vivőzaj-hibát eredményez a M-szeres PSK (QPSK)-nál.¹⁶ A 2. ábrának a jobb oldali részén a 16-SQAM konstellációja tanulmányozható.

Ugyanakkor figyelemmel kell lenni, hogy az SQAM optimuma Gaussi-csatorna rendelkezésre állása esetén valósul meg. Mivel a valós átviteli csatornánk nem teljesíti ezt a kitételeket, a vételi jelszintünk (a bithibák előfordulásával) bizonyosan eltér a kisugárzott szintektől (csatorna fading), azaz a vivőkorrekció műszaki megoldásaira ki kell dolgozni eljárásokat (offset eljárások). Ezek lehetnek a szoftveres vivőjel-korrekció/viszsaállítás és automatikus jelteljesítmény szabályzás (Automatic Gain Controlling, AGC), amelyek programozása természetesen növeli a komputációs komplexitást. A Star-QAM alkalmazása lecsökkenti a vivőjel-korrekció és az AGC alkalmazásának szükségességét, mivel az felfogható mint körcentrikus Amplitude-Phase Shift Keying (APSK) moduláció, amelynek többszörözött (az ábrázolás és az értelmezés szempontjából) amplitúdószint által definiált konstellációját optimalizált fázispontokra tervezik. A Star-QAM legalább 8 rögzített fázispontja (16 és 32 pontos konstellációk) periódikusan körbefordul a rögzített szögértékek alapján (3. ábra bal oldala a 16-Star-QAM szemléltetésére).



3. ábra

16- és 32-Star-QAM

Forrás: Praveen Kumar Singya et alii: *A Survey on Design and Performance of High-Order QAM Constellations*. 2019. 8.

¹⁵ C. Thomas – M. Weidner – S. Durrani: Digital Amplitude-Phase Keying with M-Ary Alphabets. *IEEE Transactions on Communications*, 22. (1974), 2. 168–180.

¹⁶ Ke-Lin Du – M. N. S. Swamy: *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 2010. 197–199.

Jelelőállítás és demoduláció szempontjából komplexebb helyzetet eredményez, hogy e konstelláció esetében nem csak a vízszintes és a függőleges határolásra kell ügyelni. A 16-Star-QAM esetében a teljes konstellációt 8 régióra osztják fel, 4 bit szükséges a 16 konstellációs pont definiálására. Ez esetben is az utolsó 3 bit a konstellációs szögváltozást határozza meg, míg az első bit az amplitúdó értékét mutatja, annak változását jelzi. Demoduláció esetében a szimbólumok visszaalakítása egyfajta összehasonlítás az adott pillanatban értelmezhető és a megelőző szimbólum amplitúdó- és fázisszög-helyzetének. Az amplitúdók értékét az origóhoz közelebbi fázispontokon jelöljük r_i -vel, míg a távolabbi konstellációs pontokon r_o -val, a dekódolandó jelamplitúdó legyen r_t és r_{t+1} az idő függvényében. A visszaalakított jel értéke 1 (100%), ha teljesül az alábbi egyenletrendszer (1. egyenlet).¹⁷

$$\frac{r_t + 1}{r_t} > \frac{r_i + r_o}{2} \quad (1)$$

$$\frac{r_t + 1}{r_t} < \frac{2}{r_i + r_o}$$

Ha ϑ és $\vartheta+1$ az amplitúdóhoz tartozó szögérték az idő (t) függvényében, a demodulált fázisszög értéke az alábbi összefüggéssel számítható (2. egyenlet).¹⁸

$$\theta_{dem} = (\theta_{t+1} - \theta_t) \bmod 2\pi \quad (2)$$

Az immáron dekódolt szögérték (θ_{dem}) a meghatározott $\pi/4$ tartományban (kvadránsban) értelmezhető. A 3. ábrán tanulmányozható döntési pontok/régiók (amplitúdó- és szögértékek elméleti helyzetei) rendszerét alkalmazzák magasabbrendű Star-QAM esetében is.

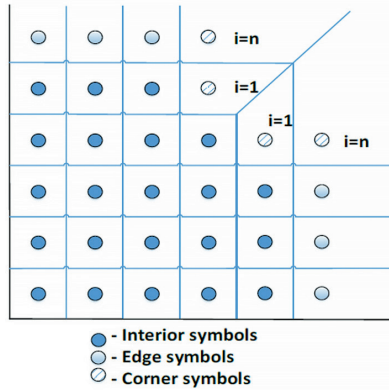
Csökkentett Peak-to-Average-Ratio (PAPR) és megnövelt csatornanyereség¹⁹ eléréséhez Simon és Smith XQAM-eljárást javasol.²⁰ Itt az M -szeres QAM 2^{2n} és 2^{2n+1} értékeket vehet fel, ahol n a bit/szimbólum mennyisége (száma). Az n bármely értéket felvehet, amely nagyobb vagy egyenlő kettőnél: $M = 2^{2n+1}$. M értéke tehát lehet 32-128-512-2048. Demodulációs tekintetben a vízszintes és függőleges kvadránsokban (döntési régiók) elhelyezett bitscsoportok (szimbólumok) az origóra szimmetrikusan három csoportosítást vehetnek fel. Ezek a belső szimbólumok csoportjai (*interior symbols*, IS), a sarokszimbólumok csoportosításai (*corner symbols* CS) és az élszimbólumok csoportjai (*edge symbols*, ES) (4. ábra).

¹⁷ Praveen Kumar Singya et alii: *A Survey on Design and Performance of High-Order QAM Constellations*. 2019. 6.

¹⁸ Uo. 6.

¹⁹ Nagendra Kumar – Praveen Kumar Singya – Vimal Bhatia: ASER Analysis of Hexagonal and Rectangular QAM Schemes in Multiple-Relay Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67. (2018), 2. 1815–1819.

²⁰ M. Simon – J. Smith: Hexagonal Multiple Phase-and-Amplitude Shift-Keyed Signal Sets. *IEEE Transactions on Communications*, 21. (1973), 10. 1108–1115.

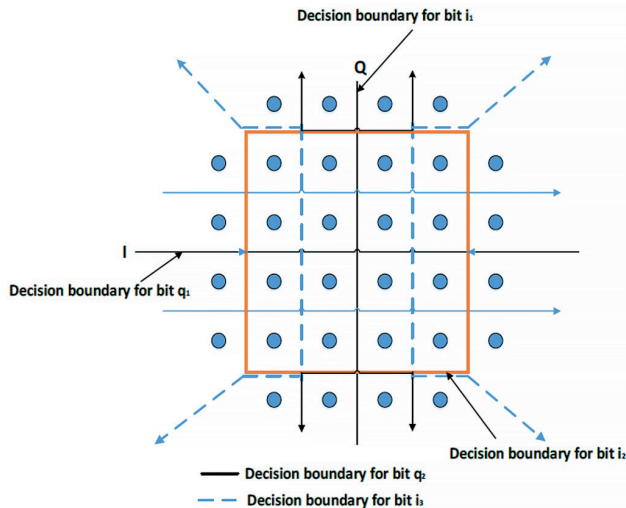


4. ábra

Kvadránskép 128-QAM esetén

Forrás: Singya et alii (2019) i. m. 9.

A jelfeldolgozás tekintetében az IS a két dimenzióban zárt körökként értelmezhető, ES vizsgálatában négyszögletes forma adódik, míg a CS 45° -os szöget zárnak be a vízszintes és függőleges tengelyekkel. Az ezen döntési régiókban elhelyezett szimbólumok sajátos elrendezése jellemző az alkalmazott QAM-re és biztosítja a magas bit (szimbólum) sűrűséget az ajánlásoknak megfelelően. A 5. ábrán követhetők a 32-QAM döntési régiói 5 bit (i_1 i_2 i_3 q_1 q_2) esetében. Az i_1 és q_1 bitek esetében a döntési régiók mind a vízszintes, mind a függőleges tartományban értelmezhetők, i_2 , i_3 és q_2 biteket azonban a korábbi döntési régiókat bővítvén, a 45° -kal eltolt szakaszokon értelmezzük.



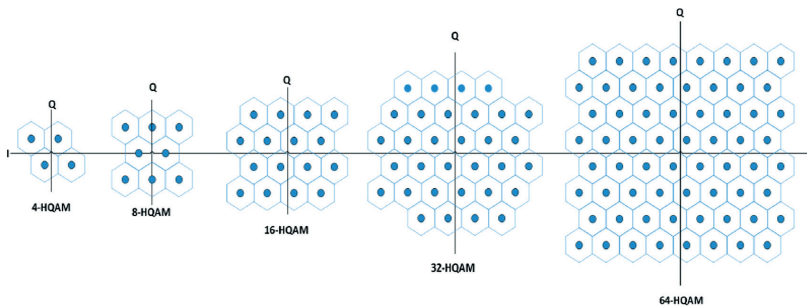
5. ábra

Döntési régió értelmezése 32-QAM esetén

Forrás: Singya et alii (2019) i. m. 10.

A döntési régiókban tehát a horizontálisan, a vertikálisan és a 45°-os szögben elhelyezett szimbólumok után a kereszt-QAM megnevezés adható. A kereszt-QAM a bitcsoportoknak a síkban történő értelmezésen túllépve, azokat a térben vizsgálva (3D), keresztirányban modellezhető a 90°-os (ortogonális In-phase és Q-Phase) és 45°-os szögeltérésekkel. Belátható tehát, hogy az XQAM a komplexitásának okán hatékonyabban támogatja a nagyobb szimbólumsűrűség megvalósítását, azaz a nagyobb adatsebességre törekvést. Az XQAM-nek ez az előnye között sorolható fel,²¹ míg hátrányai között említést érdemel a megnövekedett komputációs igény és a csatornateljesítmény helyes megválasztásának kihívásai.²²

Az energiahatékonyság, teljesítményhatékonyság növelése továbbra is kiemelten fontos a modulációs eljárások és a csatornaátvitel szempontjából. A szimbólumhibák valószínűsége növekszik a komplexebb (M-szeres) konstellációk tervezésekor, a szimbólumteljesítmény nagymértékben függ a szimbólum elhelyezésétől az adott kvadráns és az origó viszonylatában. A szimbólumteljesítmény kontrollálása érdekében dolgozták ki a HQAM modulációs eljárást.²³ Ebben az esetben az adott szimbólumkonstelláció a kvadránsokban definiált koncentrikus körök középpontjaiban helyezkedik el. E rendszerben megkülönböztetünk szabályos HQAM-et (*Regular HQAM* R-HQAM) és szabálytalan HQAM-et (*Irregular HQAM* IR-HQAM) annak függvényében, hogy e szimbólumközpontok – a síkban ábrázolva – az origóra szimmetrikusak-e. A síkban (2D) vizsgálva, a legkisebb távolság két egymás mellett elhelyezkedő szimbólumkonstelláció tekintetében hexagonálisan értelmezhető. A HQAM szimbólumcsoport távolságai (szimbólumcsoport-távolság értéke d és d többszörösei) a $2\sqrt{3}d^2$ összefüggéssel számolható.²⁴ Összehasonlítva ezt az XQAM-konstellációk távolságértékeivel, a szimbólumcsoportok átlagos távolságára a 0,866 értéket kapjuk,²⁵ azaz ez a modulációs eljárás a szimbólumsűrűség tekintetében előnyösebb (6. ábra); ez teszi lehetővé a teljesítmény-hatékonyság 0,6 dB-es növekedését.



6. ábra

Döntési régió értelmezése HQAM esetében

Forrás: Singya et alii (2019) i. m. 12.

²¹ Mamta Agiwal et alii: Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18. (2016), 3. 1617–1655.

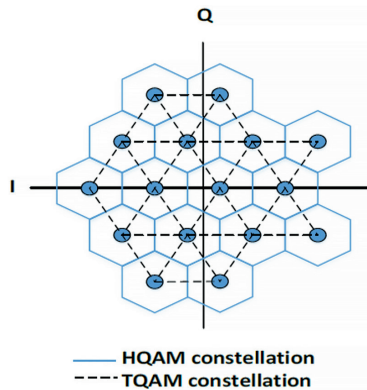
²² Kyeongyeon Kim et alii: *Pre-processing Based Soft-demapper for Per-tone MIMO Operation in QAM FBMC Systems*. IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2015. 507–511.

²³ Bach T. Vu et alii: Bit Error Rate Analysis of Rectangular QAM/FSO Systems Using an APD Receiver Over Atmospheric Turbulence Channels. *Journal of Optical Communications & Networking*, 5. (2013), 5. 437–446.

²⁴ G. Forney et alii: Efficient Modulation for Band-limited Channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2. (1984), 5. 632–647.

²⁵ W. Weber: Differential Encoding for Multiple Amplitude and Phase Shift Keying Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 26. (1978), 3. 385–391.

HQAM-re több hivatkozást találunk a szakirodalomban, mint háromszög-QAM (*Triangle-QAM* TQAM). Az e módon rendszerezett szimbólumcsoportok elhelyezésére HQAM-mel azonos konstellációs pontokat használhatunk, azonban az értelmezésbeli eltérés a TQAM és a HQAM között az, hogy HQAM esetében a konstellációs pontokat hatszög alakban vizsgáljuk, és ezen hexagonok egymástól $2d$ távolságban definiálhatók (7. ábra). Ebben az értelmezésben a TQAM felfogható egyfajta nukleusznak is a HQAM kialakítására.²⁶



7. ábra

16-HQAM konstelláció

Forrás: Singya et alii (2019) i. m. 11.

Mivel a konstellációs pontok a hexagonális értelmezésben összekapcsolhatók (szabálytalan 16-HQAM), egyértelműnek tűnik, hogy HQAM esetében alapvetően TQAM-ről beszélünk, amelynek speciális csoportosítása adja a HQAM-et. R-HQAM esetében egyszerűbb a szimbólumdetektálás, és a SER értéke a moduláció M -szeres növelésével csökkenthető, ami a szimbólumteljesítmények csökkenését eredményezi a szimbólumsebesség megtartásával. IR-HQAM esetében a teljesítményhatékonyság ugyan az optimumra állítható be (ami előnyösebb az R-HQAM-nél), azonban a bitek detektálása megnöveli a jelelállítás komplexitását. Az M -szeres HQAM átlagos energiafelhasználása (teljesítményfelhasználása) (*Average Energy Consumption* AEC) kisebb, mint az SQAM alkalmazásakor (M -szeres SQAM), kivéve $M = 4$ esetében: 4-HQAM és 4-SQAM azonos AEC-vel értelmezhető,²⁷ azonban az előbbi NN-értéke (*Nearest Neighbor bit/symbol*) előnyösebb.²⁸

Összefoglalva tehát a röviden bemutatott SQAM, XQAM és HQAM modulációs eljárásokat, belátható, hogy a szimbólumkomplexitás növelésével az általános adatátviteli (szimbólumátviteli) sebesség, az adatsebesség jelentősen növelhető a rendszerteljesítmény általános értékének csökkentésével, ugyanakkor a jelelállítás

²⁶ Sung-Joon Park: Triangular Quadrature Amplitude Modulation. *IEEE Communications Letters*, 11. (2007), 4. 292–294.

²⁷ Onel Harrison: *Machine Learning Basics with the K-Nearest Neighbours Algorithm*. 2018.

²⁸ Shuai Ma et alii: Signal Demodulation with Machine Learning Methods for Physical Layer Visible Light Communications: Prototype Platform, Open Dataset and Algorithms. *IEEE Access*, 7. (2019), 30588–30598. 30590.

és a demoduláció szempontjából a komputációs feladatok jelentősen megnövekednek. Ezzel együtt is, az IR-HQAM lehet az 5GN-hálózatok alapvető modulációs eljárása az IMT-2020 ajánlásban megfogalmazottak kielégítésére.

4. Következtetések

Az IMT-2020 ajánlásban meghatározott adatsebesség, a csatorna sávszélessége és a teljesítményoptimum (energiaoptimum) elérése alapvető kötelezettség az 5GN követelményeinek teljesítéséhez. A modulációs eljárás alapjaiban határozza meg a szimbólumsűrűség szintjét, és az adott rádiócsatornára optimalizált jel-előállítás teszi lehetővé a SDN adaptív működését.²⁹ A tudományos közleményben bemutatott Quadratura Amplitúdó Moduláció evolúciójának a feldolgozásával alapvető képet kapunk a szolgáltatásalapú hálózatok igény szintjének a kielégítésére hivatott koherens, a vezetékes és a vezeték nélküli adatátviteli rendszereket integráló komplex hálózatok alapvető modulációs eljárásairól. E hálózatok – benne az integrált vezérlő áramkörökkel megvalósított modulációs és demodulációs hálózati elemekkel – évek óta léteznek és napi használatban vannak az LTE-A (4G) és az IEEE 802.11 szabvány családra tervezett aktív áramköri (hálózati) elemek mindennapi üzemeltetése folyamán.³⁰

Belátható, hogy a magasabbrendű (M-szeres QAM) modulációs eljárások jelentősen megnövelik az átviteli rendszerek, a hálózatok komplexitását és komputációs igényét, így a hálózattervezők számára az egyensúly keresése a nagy(obb) adatátviteli sebesség (magasabb szintű modulációk programozása), a csatornateljesítmény-felvétel alacsony szinten tartásával a mindennapos kutatási területek egyikét jelentik. Kijelenthető, hogy a fenti szabványokban és a jelen ajánlásaiban szereplő adatátviteli rendszerparaméterek biztosítása a rendszer elemek (modulációs blokk, végerősítő, illesztő-szimmetrizáló egység, [adaptív] antennarendszer, majd a vételi oldalon ugyanezen elemek fordított sorrendű kialakítása a megfelelő javító/jelvisztaállító áramkörökkel) egyelőre – hálózati tekintetben – hatékonyan megtervezett, jól kiépített, urbanus környezetben működhetnek azon a határfokon, ami előírt. Az alkalmazott magasabbrendű modulációs eljárások és az illeszkedő csatornanyalábolási megoldások (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*, OFDMA) igénylik a sűrűn elhelyezett vezeték nélküli hálózati elemek kialakítását (speciális antennák, bázisállomások stb.). Ugyanakkor a rendszerevolúcióból jól kalkulálható a fejlődés iránya és mértéke, amely irány a hálózati lefedettség növekedését jelenti a kevésbé urbanizált területszakaszokra, geográfiai területekre is. Az 5GN fejlesztésének ezen iránya a katonai alkalmazásokra tekintettel is figyelemre méltó. Számomra tehát egyértelműnek tűnik, hogy a QAM fejlesztésének az 1950-es években megkezdett lendülete nem fog alábbhagyni, újabb és újabb, komplexebb (N-szeres) QAM-ek tervezésével és alkalmazásával fogunk találkozni – az 5GN kiépülését és stabil üzemét követően – akár egy évtizeden belül, a 6G-hálózatok telepítése területén.

²⁹ Yunlong Cai et alii: Modulation and multiple access for 5G networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20. (2018), 1. 629–646. 631–640.

³⁰ *WiFi Standards: IEEE 802.11*.

E tudományos közlemény keretei nem teszik lehetővé az SQAM, az XQAM és a HQAM részletekbe menő bemutatását, így eltekintettem a részletes SER-/BER-analízistől, a döntési régiók feldolgozásától, a részletesebb bit-mapping elemzéseitől, ugyanakkor a hivatkozásokban az érdeklődő olvasó részletekbe menően felkészülhet e fenti területekből annak érdekében, hogy teljeskörűen átlássa és feldolgozza a QAM-tématerületét.

Figyelemre méltó kutatási terület lehet az M-szeres QAM-nek az adaptív antennarendszerekhez (*Massive Multi-user Multiple In Multiple Out*, MU-MIMO) illesztése, a magasabb rendű QAM-szimbólumcsoportok térbeli kicsatolása, hiszen a végfelhasználói terminálok tekintetében nem lehetséges a komplex antennarendszerek telepítése azok mérete, tömege és az üzemeltetésük szabályzóinak figyelembevételé miatt.³¹ Jóllehet az UE-k szoftveres fejlesztéssel képessé tehetők magasabb rendű QAM-modulációra és -demodulációra (OFDMA), az antennarendszerük fejlesztése további kihívásokkal kecsegteti a vállalkozó szellemű mérnöki állományt.³²

Mivel a katonai alkalmazások területén is növekvő az igény a komplex hálózati kialakításra olyan végponti és vezérlő hálózati elemek telepítésével, amelyek az általános rendszerigények kielégítésén túl képesek a katonai követelmények (emelt szintű zavarállóság, kis tömeg párosítva robusztus kialakítással és rázkódásvédelemmel, csatornazárási technológiák integrált tervezése és alkalmazása stb.) biztosítására is, belátható hogy a tervezési folyamatoknak erre a területre is fókuszálniuk kell.³³ Az általános irányvonal a polgári alkalmazások fejlesztésének az elsődlegessége. A reményemet fejezem ki, hogy a komplex rendszerszolgáltatásokat biztosító polgári hálózatok megbízható telepítését és üzemeltetését követően, vagy akár azzal azonos időben a katonai vezeték nélküli adatátviteli hálózatokban is megjelennek a 21. századi technológiáknak megfelelő, az 5GN rendszerkövetelményeket kielégítő, de már a katonai alkalmazásokhoz illesztett aktív hálózati elemek (UE).³⁴ Ezek hatékony alkalmazása – legalább a válságreagáló műveletekben – már napjainkban is alapvető fontosságú.

Felhasznált irodalom

- Agiwal, Mamta – Abhishek Roy – Navrati Saxena: Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18. (2016), 3. 1617–1655. DOI: <https://doi.org/10.1109/comst.2016.2532458>
- Cahn, C.: Combined Digital Phase and Amplitude Modulation Communication Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 8. (1960), 3. 150–155. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcom.1960.1097623>

³¹ Károly Krisztián – Németh András: The Possibilities of Supporting the Public Functions with Fleet and Force Tracking Systems, *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 18. (2019), 3. 55–67.

³² Németh András – Károly Krisztián: Erőkövetés megvalósításának lehetőségei korszerű harcászati rádiórendszerek kommunikációs csatornáin. *Honvédségi Szemle*, 145. (2017), 4. 120–131.

³³ Németh András – Károly Krisztián: Korszerű rövidhullámú harcászati rádióeszközök erőkövető rendszerekben való alkalmazhatóságának vizsgálata. *Honvédségi Szemle*, 144. (2016), 6. 65–78.

³⁴ *Science & Technology Trends 2020–2040*. Brussels, NATO Science & Technology Organization, 2020. 8–17.

- Cai, Yunlong – Zhijin Qin – Fangyu Cui – Geoffrey Ye Li – Julie A. McCann: Modulation and Multiple Access for 5G Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20. (2018), 1. 629–646. DOI: <https://doi.org/10.1109/comst.2017.2766698>
- Campopiano, C. – B. Glazer: A Coherent Digital Amplitude and Phase Modulation Scheme. *IEEE Transactions on Communications*, 10. (1962), 1. 90–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcom.1962.1088634>
- Courtade, Thomas A. – Jiadong Wang – Richard D. Wesel: *Superposition Coding to Support Multiple Streams, Priorities and Channel Capabilities in the Context of GMSK*. Military Communications Conference, Department of Electrical Engineering, University of California, Los Angeles, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/milcom.2011.6127740>
- Du, Ke-Lin – M. N. S. Swamy: *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 2010.
- Forney, G. – R. Gallager – G. Lang – F. Longstaff – S. Qureshi: Efficient Modulation for Band-limited Channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2. (1984), 5. 632–647. DOI: <https://doi.org/10.1109/jsac.1984.1146101>
- Hancock, J. – R. Lucky: Performance of Combined Amplitude and Phase-modulated Communication Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 8. (1960), 4. 232–237. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcom.1960.1097638>
- Harrison, Onel: *Machine Learning Basics with the K-Nearest Neighbours Algorithm*. 2018. Elérhető: <https://towardsdatascience.com/machine-learning-basics-with-the-k-nearest-neighbors-algorithm-6a6e71d01761> (A letöltés dátuma: 2020. 04. 20.)
- Houghton, John: *Calculating QAM Bandwidth Gains*. *WiFi Standards 802.11*. NeoPhotonics Review, 2017. Elérhető: www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/standards.php (A letöltés dátuma: 2020. 05. 11.)
- ITU-R: *Recommendation ITU-R M.2021-3 (IMT-Advanced)*. January 2018.
- ITU-R: *Recommendation ITU-R M.2021-4 (IMT-Advanced)*. November 2019.
- Károly Krisztián: Globális Műholdas Navigációs Rendszerek alkalmazási lehetőségei katonai és polgári célú flotta- és erőkövetési rendszerekben (1.). *Honvédségi Szemle*, 146. (2018), 1. 83–97.
- Károly Krisztián: Szenzorhálózatok adatainak integrálási lehetőségei a perspektivikus erőkövetési rendszerekbe, különös tekintettel az egyéni egészségügyi adatokra. *Hadmérnök*, 14. (2019), 1. 260–270.
- Károly Krisztián: LoRaWAN-technológia felhasználási lehetőségei a katonai alkalmazások tükrében. *Hadmérnök*, 14. (2019), 3. 101–111.
- Károly Krisztián – Németh András: The Possibilities of Supporting the Public Functions with Fleet and Force Tracking Systems. *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 18. (2019), 3. 55–67. DOI: <https://doi.org/10.32565/aarms.2019.3.4>
- Keim, Robert: *Understanding Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Modulation*. EETech Media LLC, 2016. Elérhető: www.allaboutcircuits.com/technical-articles/quadrature-phase-shift-keying-qpsk-modulation/ (A letöltés dátuma: 2020. 04. 16.)
- Kim, Kyeongyeon – Yeo Hun Yun – Chanhong Kim – Zuleita Ho – Yong-Ho Cho – Ji-Yun Seol: *Pre-processing Based Soft-demapper for Per-tone MIMO Operation in QAM*

- FBMC Systems*. IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/pimrc.2015.7343352>
- Kumar, Nagendra – Praveen Kumar Singya – Vimal Bhatia: ASER Analysis of Hexagonal and Rectangular QAM Schemes in Multiple-Relay Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67. (2018), 2. 1815–1819. DOI: <https://doi.org/10.1109/tvt.2017.2758028>
- Ma, Shuai – Jiahui Dai – Songtao Lu – Hang Li – Han Zhang – Chun Du – Shiyin Li: Signal Demodulation with Machine Learning Methods for Physical Layer Visible Light Communications: Prototype Platform, Open Dataset and Algorithms. *IEEE Access*, 7. (2019), 30588–30598. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2903375>
- Mádi Gábor: *LTE uplink rádiós interfész szimulációs vizsgálata*. Szakdolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos és Informatikai Kar, Híradástechnikai Tanszék, 2009.
- Naik, Suketu: *EE4900/EE6720 Digital Communications Lecture 9, Digital Modulation, Demodulation Part 3*. Tutorial presentation, Weber State University.
- Németh András – Károly Krisztián: Erőkövetés megvalósításának lehetőségei korszerű harcászati rádiórendszerek kommunikációs csatornáin. *Honvédségi Szemle*, 145. (2017), 4. 120–131.
- Németh András – Károly Krisztián: Korszerű rövidhullámú harcászati rádióeszközök erőkövető rendszerekben való alkalmazhatóságának vizsgálata. *Honvédségi Szemle*, 144. (2016), 6. 65–78.
- Park, Sung-Joon: Triangular Quadrature Amplitude Modulation. *IEEE Communications Letters*, 11. (2007), 4. 292–294. DOI: <https://doi.org/10.1109/lcom.2007.348278>
- Science & Technology Trends 2020–2040*. Brussels, NATO Science & Technology Organization, 2020.
- Sheridan, Julie – Chris Kocot: *Quadrature Amplitude Modulation*. Optical Fiber Telecommunications (Sixth edition) 2013. Elérhető: www.sciencedirect.com/topics/engineering/quadrature-amplitude-modulation (A letöltés dátuma: 2020. 04. 16.)
- Simon, M. – J. Smith: Hexagonal Multiple Phase-and-Amplitude Shift-Keyed Signal Sets. *IEEE Transactions on Communications*, 21. (1973), 10. 1108–1115. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcom.1973.1091549>
- Singya, Praveen Kumar – Parvez Shaik – Nagendra Kumar – Vimal Bhatia – Mohamed-Slim Alouini: *A Survey on Design and Performance of High-Order QAM Constellations*. 2019. Elérhető: <https://arxiv.org/abs/2004.14708> (A letöltés dátuma: 2020. 11. 24.)
- Thomas, C. – M. Weidner – S. Durrani: Digital Amplitude-Phase Keying with M-Ary Alphabets. *IEEE Transactions on Communications*, 22. (1974), 2. 168–180. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcom.1974.1092165>
- Tóth Balázs: *Hasít az 5G Budapest belvárosában*. Index, 2020. Elérhető: https://index.hu/techtud/2020/06/17/teszteltuk_a_telekom_5g-jet/ (A letöltés dátuma: 2020. 06. 17.)
- Vu, Bach T. – Ngoc T. Dang – Truong C. Thang – Anh T. Pham: Bit Error Rate Analysis of Rectangular QAM/FSO Systems Using an APD Receiver Over Atmospheric

Turbulence Channels. *Journal of Optical Communications & Networking*, 5. (2013), 5. 437–446. DOI: <https://doi.org/10.1364/jocn.5.000437>

Weber, W.: Differential Encoding for Multiple Amplitude and Phase Shift Keying Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 26. (1978), 3. 385–391. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcom.1978.1094074>

Internetes források

What is QAM? Electronics Notes. Elérhető: www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/quadrature-amplitude-modulation-what-is-qam-basics.php (A letöltés dátuma: 2020. 06. 01.)

WiFi Standards: IEEE 802.11. Elérhető: www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/standards.php (A letöltés dátuma: 2020. 05. 11.)