

Digitális TV-adóberendezések rádiófrekvenciás fokozatai

DR. FALUS LÁSZLÓ

l.falus@chello.hu

Kulcsszavak: DVB-T adó, tranzisztoros teljesítményerősítő, lineáris és nemlineáris torzítások, digitális előtorzító

A rendszeres földfelszíni digitális műsorsugárzás Európa kilenc országában működik és további ötben ez évben indítják meg. A tapasztalatok alapján kialakultak a jellemzők követelményei, a mérési módszerek és a berendezések felépítése. Az adó részei a kódoló mellett a rádiófrekvenciás modulátor, a teljesítményerősítő és a szűrőegységek. Fontos, hogy ezek a fokozatok kis mértékben torzítsák a továbbított jeleket és megfeleljenek a spektrum-követelményeknek. Az általuk befolyásolt jellemzőkkel, felépítésükkel és a torzítások korrekciójával foglalkozik a cikk.

A földfelszíni digitális TV műsorszórását, a DVB-T-t Európában a 170-230 MHz-es III., illetve a 470-862 MHz-es IV/V. sávban valósítják meg. Magyarországon nincs szabad csatorna a III. sávban, így az adók az utóbbi tartományban fognak működni. Az átmeneti időszakban a jelenlegi analóg adók és az új, digitális adók párhuzamosan sugároznak majd, ami megkívánja az összeférhetőség biztosítását.

Az analóg adóberendezések kimenő-teljesítménye általában legfeljebb 20 kW, ritkán 40 kW. A digitális adóké ennek törtrésze, legfeljebb 6 kW. A hatásos kisugárzott teljesítmény (Effektive Radiated Power, ERP) az antennarendszer nyereségének következtében az adóteljesítmény többszöröse. A berendezéseknek úgy a digitális jelkialakító, kódoló, mint a rádiófrekvenciás részekben új áramköri és méréstechnikai követelményeket kell teljesíteniük. A jeltorzítások többsége a rádiófrekvenciás fokozatokban keletkezik, így ennek elemzése és a csökkentésüket eredményező előtorzítás a digitális adástechnika fontos kérdése.

A DVB-T adó felépítése

Az adó főbb részei a meghajtófokozat, a teljesítményerősítő és a kimeneti szűrő. Ezen kívül lényeges feladatokat teljesít még az automatika, a tápegység és a hűtőrendszer. A főbb részek feladatai a következők:

Meghajtófokozat

A fokozat a külső forrásból, a multiplexerből érkező kódolt és egyesített, MPEG-2 szabványú adatfolyamot fogadja. Feladata a jeleknek a DVB-T szabvány [1] szerinti kialakítása és illesztése a földfelszíni csatorna átviteli jellemzőihez. A jel hibavédelméhez elvégzi a külső és a belső kódolást és átszövést, a leképezést, az ortogonális frekvenciaosztásos multiplexelést, más szóval az OFDM jel kialakítását [6], továbbá a védelmi időköz beiktatását és a nagyfrekvenciás vivő modulálását. A jelek a kódolást követően fázisban lévő (I) és kvadra-

túra (Q) összetevőkként csatlakoznak a digitális előtorzító egységhez. Az előtorzító feladata fontos a rádiófrekvenciás jellemzők szempontjából. Az előtorzító után megtörténik az I és a Q jelek digitális-analóg átalakítása, majd a moduláció. Ennek eredménye a meghajtó fokozat kimenetén az előtorzított, kisteljesítményű nagyfrekvenciás meghajtójel. Az előtorzítót az I/Q modulátor követi. Ez az első rádiófrekvenciás fokozat, mivel kimenetén már vivőfrekvenciás RF jel van.

Teljesítményerősítő

A fokozat a kisteljesítményű meghajtójelet erősíti az adóberendezés kimenő-teljesítményének szintjére. A DVB-T adókban ma már szinte kizárólag tranzisztoros erősítőket alkalmaznak, bár bizonyos esetben igyekeznek induktív kimenetű adócsöveket (IOT) alkalmazni, mert azok egyes adóüzemeltetőknél az analóg adókhoz raktáron vannak. A félvezetős fokozat a kimenő-teljesítménytől függően egy, vagy több fiókos egységből áll, amelyeket paraleljárató egységek kapcsolnak össze. A fokozatok és ezzel az egész berendezés hűtésére újabban folyadékűtést alkalmaznak.

Kimeneti szűrő

A hírközlési hatóságok a nemzetközileg egyeztetett szabványok alapján előírják és ellenőrzik a berendezések káros jelkibocsátását. Ebből a szempontból a DVB-T adóknál elsősorban a sokvivős átvittel összefüggő, csatornán kívüli spektrumot kötik meg. Ennek a szabványnak a kielégítése az esetek túlnyomó többségében csak a kimeneten beiktatott sávszűrővel lehetséges.

Rádiófrekvenciás fokozatok

Teljesítményerősítő

Az adóberendezések nagyteljesítményű tranzisztorai első megjelenésük óta nagy változáson mentek át. A bipoláris, majd a MOS után ma az LDMOS tranzisztorokat alkalmazzák a korszerű erősítőkben.

Az LDMOS tranzisztoroknak a bipolárisokhoz viszonyított előnyei, hogy túriuk a terhelésről visszaverődött teljesítményt, a túlvezérlést és a digitális jeleknél előforduló nagy csúcsteljesítményt, továbbá erősítésük is nagyobb. Erősítési görbéjük lineárisabb, így a sokvívós, a DVB-T jelek esetén kisebb az intermodulációs torzítás. Az alkalmazott gyártási módszer és a tokozási megoldás megbízhatóbb működést, hosszabb élettartamot eredményez.

Több cég is gyárt TV adók számára LDMOS tranzisztorokat. A Philips BLF861A típusa 860 MHz-en, AB osztályú beállításban analóg TV jelek esetén tipikusan 170 W kimenő-teljesítményre képes 14 dB erősítés mellett, a DVB-T teljesítményt a gyártó nem közli. A tokban két, ellenütemű működésre tervezett térvezérlésű tranzisztor van, amelyek source-át közvetlenül csatlakoztatják a fém alaplemezhöz (flange). Az erősítő áramkörre a be- és a kimeneti szimmetrizálókbl és illesztő szakaszokból áll (1. ábra).

Az erősítő áramkörének elsődleges feladata a be- és a kimenet szimmetrizálása, továbbá a tranzisztor szélessávú illesztése. Az aszimmetrikus ki- és bemenet és az ellenütemű tranzisztor közötti szimmetrizálást koaxiális kábelből kialakított tápvonalak valósítják meg. Az illesztő áramkörök feladata, hogy a mintegy 400 MHz szélességű sávban illessze a tranzisztort az erősítő 50 Ohmos be- és kimenetéhez. A BLF861A típusú tranzisztor bemenő impedanciája a sávban $1 + j3$ és 11 Ohm közötti értékű. Az optimális terhelés $8 + j5$ és $2,5$ Ohm közötti. Ezeket, a fokozat 50 Ohmos csatlakozó impedanciájának tört részét jelentő komplex impedanciákat kell széles sávban illeszteni a be- és a kimeneten. Az első illesztő szakaszok a tranzisztor belsejében vannak, a továbbiakat szalagvonalas tápvonal szakaszokkal valósítják meg.

A teljes, 470-860 MHz közötti sávra megvalósított egyenletes frekvenciamenet eredményeként a 8 MHz széles DVB-T csatornában a lineáris torzítás, az amplitúdó és a csoportkésleltetés (group delay) ingadozása elhanyagolható. A teljesítményerősítők megbízható működésének alapfeltétele a kifogástalan hűtés. A tranzisztorban fellépő hő útjának első szakasza a réteg és

a tok közötti belső, majd a tok és a hűtőtömb közötti külső átmenet. A belső szakaszt a tranzisztor technológiája, a külsőt a tok és az erősítő konstrukciója határozza meg. Az egy-egy tranzisztort tartalmazó modulokból kialakított meghajtó- és végerősítőt közös felületre, a hűtőtömbre szerelik. A hőt erről korábban áramló levegővel, ma a tömbben áramoltatott folyadékkal szállítják el.

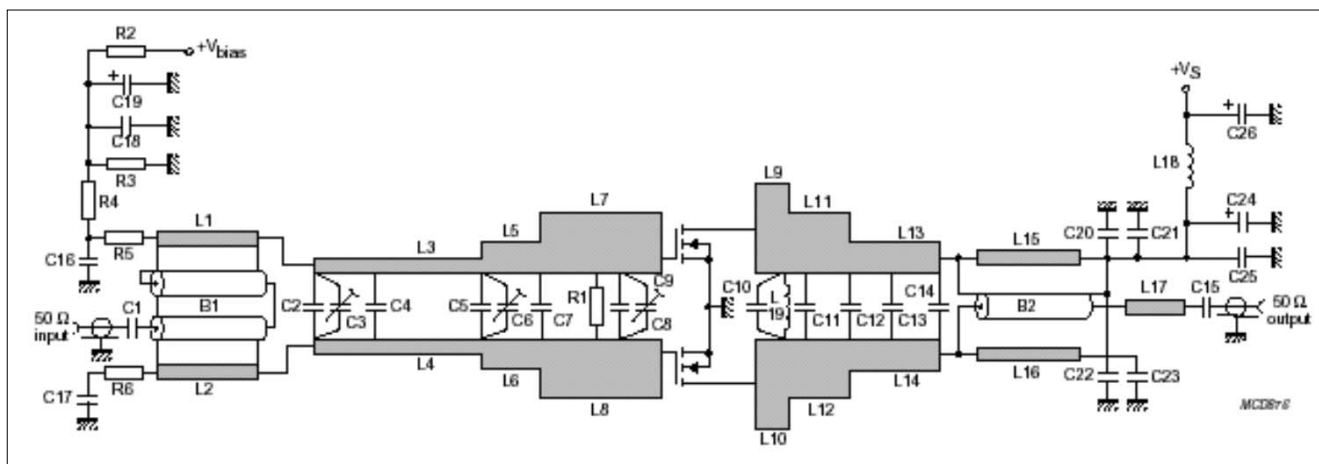
A modulokat szélessávú teljesítmény-elosztók és összegezők kapcsolják össze, amelyek egyenlő arányban szétosztják a bemenő teljesítményt és összegezik a kimenő teljesítményeket. Ezek általában a Wilkinson-csatoló elve szerint épülnek fel és alkalmasak a nyomtatott, szalagvonalas megvalósításra. Alapegységeik a kettes és a hármas csatolók, amelyből négyes, hatos, nyolcas stb. csatolók építhetők fel. A teljesítmény-elosztók és -összegezők fontos jellemzője, hogy az összekapcsolt erősítők közül egy, vagy több hibája, kiesése esetén is biztosítják az erősítőfokozat működését csökkent teljesítménnyel. Az egy fiókos egységben kialakított erősítő DVB-T kimenő teljesítménye kb. 0,5 kW, ennél nagyobb teljesítményű adónál több, párhuzamosan működtetett egységet alkalmaznak.

Kimeneti szűrő

A teljesítményerősítő nemlineáris torzítása miatt a hasznos sávon kívüli nemkívánt összetevők jelennek meg, ami a spektrum elnyúlását, az úgynevezett szoknya kialakulását eredményezi. A 8 MHz-es, közel nyolcezer vívós, 8k rendszerénél a hasznos spektrum szélessége a közepes vívóhöz viszonyítva $\pm 3,805$ MHz. Az intermodulációs termékek a szomszédos csatornában jelennek meg és zavarhatják az ott sugárzott adást.

A DVB-T adók elektromágneses összeférhetőségre vonatkozó harmonizált szabvány [2] kétféle tűrésábrát ír elő a hasznos sávon kívüli spektrum csillapítására. Az egyik a normál, vagy nem-kritikus, a másik a kritikus esetre vonatkozik. Az előbbinél a szomszédos csatornában analóg, a másíknál pedig kisteljesítményű adás folyik. A tűrésábrából két jellegzetes pont emelhető ki, amelyek a közepes vívótól $\pm 4,3$ MHz és ± 6 MHz távolságban vannak. Az előbbi a hasznos csatorna végétől,

1. ábra Teljesítményerősítő fokozat LDMOS tranzisztorral



a szélső vivőtől 0,5 MHz távolságra van. A DVB-T adók műszaki adatai között szereplő váltótávolságot, a hasznos spektrumhoz viszonyított mellék hullám szintet is ebben a pontban kell mérni.

A nem-kritikus esetre, a hasznos spektrumhoz viszonyítva előírt csillapítás $\pm 4,2$ MHz-en 40 dB, és ± 6 MHz-en 52 dB. A kritikus esetre a szabvány 10 dB-lel szigorúbb értéket ír elő. Az adó teljesítményerősítőjének kimenetén a váltótávolság a teljesítményerősítő kivezérlésétől, torzításától és az előtorzítás hatékonyságától függ és általában szükségessé teszi kimenőszűrő alkalmazását. A kimeneti szűrő csillapítás különbsége legalább 4 dB kell legyen. A kimenőszűrő 6-8 körös sávszűrő.

Torzítások elemzése

A DVB-T jelet általában az I és Q koordinátájú konstellációs diagramban ábrázolják és torzításának mértékét a modulációs hibaarány (Modulation Error Ratio, MER) jellemzi. A konstellációs diagram a modulációs módtól függő számú, 4, 16 vagy 64 vektor végpontját és döntési területét ábrázolja. A MER a vektorok végpontjának az ideálistól való eltérését fejezi ki. A torzítások, zavarójelek és a zaj hatására a konstellációs diagram különböző változásokat mutat, amelyeket az irodalomban részletesen tárgyalnak [3].

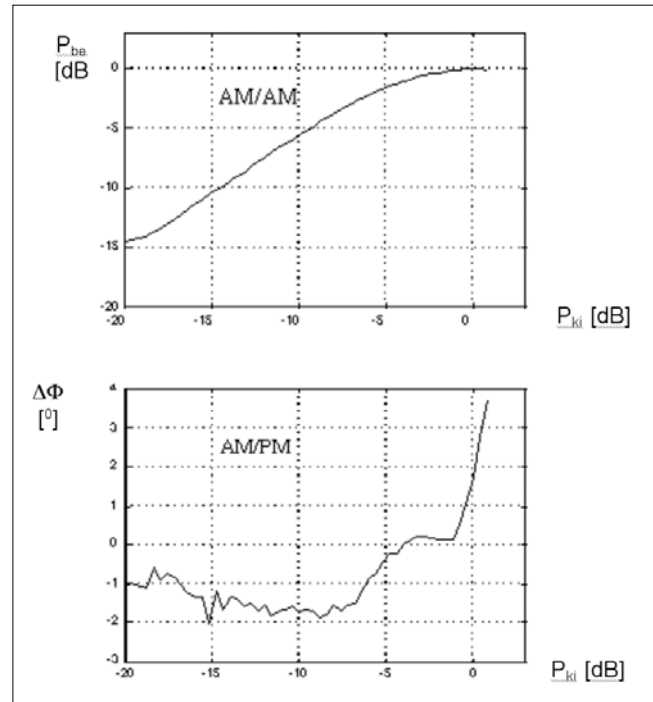
Az adóban a torzítások elsősorban az előtorzító utáni fokozatokban lépnek fel. A főbb torzítások a következők:

- Amplitúdó egyenetlenség, vagy I/Q amplitúdó-hiba.** Az I és a Q jelek amplitúdója közötti eltérést a két modulátor beállításának pontatlansága okozhatja. Hatására a konstellációs diagramban a pontok távolsága vízszintes, vagy függőleges irányban összenyomódik.
- Kvadratúra hiba, vagy I/Q fázishiba.** Ez az I és a Q jelek közötti, a 90° -hoz viszonyított eltérés. Ezt a két modulátort tápláló oszcillátor jele közötti pontatlan fázistolás okozhatja. Hatására a konstellációs diagramban a pontok helyzete elferdül.
- Vivőszivárgás.** Ebben az esetben a fellépő zavaró jel és az OFDM jel középső vivőjének frekvenciája azonos. Hatására a konstellációs diagramban a pontok a hasznos- és a zavaró-jel közötti fázisszögtől függően I, vagy Q irányban eltolódnak.
- Zavarójel bejutása.** A kisfrekvenciás zavarójel a hasznos vektorokkal összegeződik és a konstellációs diagramban pontok helyett körök láthatók.
- Zaj hozzáadódása.** A Gauss-i eloszlású zaj hozzáadódása esetén a konstellációs diagramban felhőszerű elmosódott végpont adódik. Fontos megjegyezni, hogy ilyen hatása van különböző zavaró jeleknek, mint például az intermodulációs termékeknek is.

A rádiófrekvenciás fokozatokban fellépő torzításokkal a következő szakaszokban részletesebben foglalkozunk, mivel azok részei az adó fő jellemzőinek.

A teljesítményerősítő nemlineáris torzításai

A teljesítményerősítőt alapvetően jellemzi a kis nemlineáris torzítás, a jó hatásfok és a nagy kivezérelhetőség. A nemlineáris torzítás hatása úgy a csatornán kívül, mint azon belül jelentkezik. A csatornán kívüli zavar a közeli frekvenciájú spektrumösszetevők válcsillapítással jellemzett növekedésében és a harmonikusok megjelenésében mutatkozik. A csatornán belül hatása zajjellegű ami rontja az átviteli minőséget, a konstellációs diagramban pedig elkeni a modulációs vektorok végpontját. A nemlinearitás okozói az erősítés és a fázis szintfüggősége (2. ábra).



2. ábra Erősítő AM/AM és AM/PM görbéi

Az előbbi AM-AM, az utóbbit AM-PM konverzióknak is nevezik. Az AM/AM konverzió oka az tranzisztor erősítésének, az AM-PM konverzióé pedig kimenet és bemenet közötti kapacitás feszültségfüggése.

A jó hatásfok elérése érdekében az ellenütemű tranzisztorokat AB osztályú beállításban működtetik. A kivezérelhetőség azért fontos, mert a sok vivőhullámból összetett DVB-T jel esetén nagy csúcsfeszültség alakul ki. E hatás jellemzésére szolgál a csúcstényező, a Crest Factor, ami a csúcsfeszültség és az effektív feszültség arányának logaritmus. Az elméletileg kialakuló csúcstényező a berendezésekben maximum 13 dB. A kivezérelhetőség és egyéb szempontok miatt ugyanazt az LDMOS tranzisztoros erősítőt analóg adóban 2 kW szinkroncsúcs kimenő-teljesítményre és DVB-T jelek esetén 440 W effektív teljesítményre veszik igénybe.

A kimenőszűrő lineáris torzításai

A kimenőszűrőnek a csatornán kívüli spektrum előírt túrására-megvalósításához specifikálni kell a csillapítást. A csatornán belüli amplitúdó-ingadozás a körök számától, a vivőfrekvenciától és attól függ, hogy kritikus,

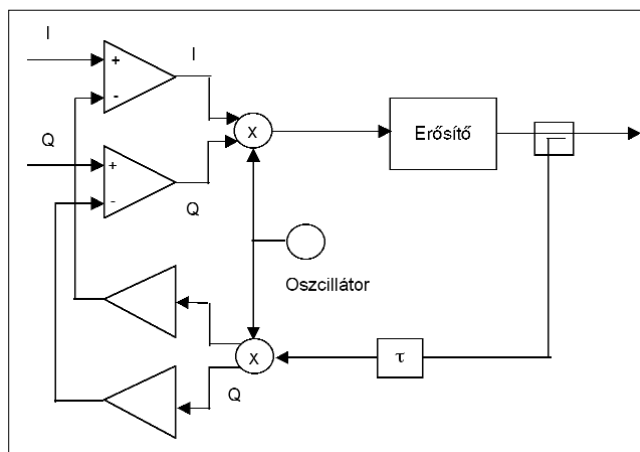
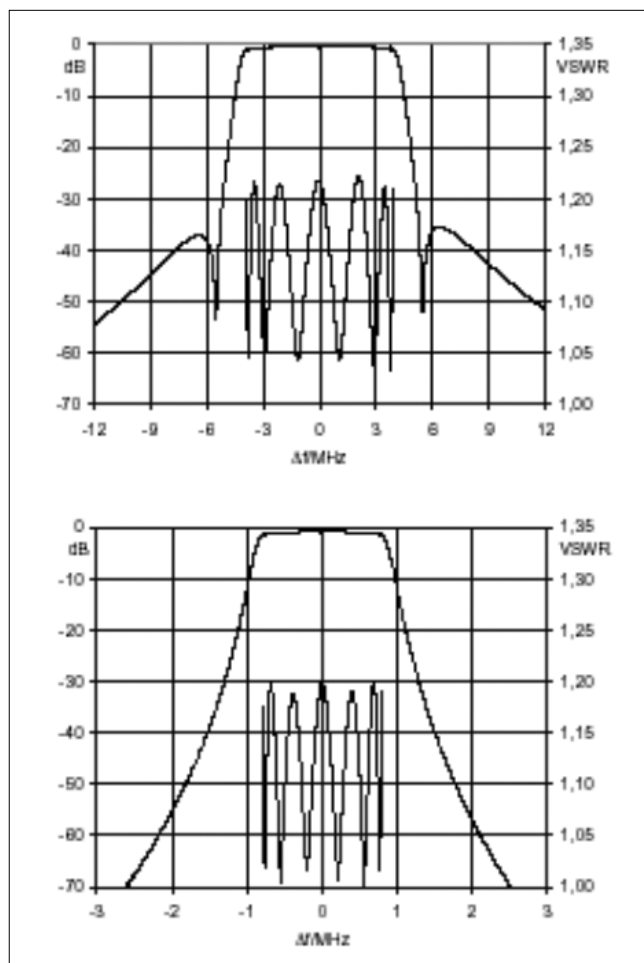
vagy nem-kritikus esethez alkalmazzák. Kritikus esetben a két sávhátáron a csillapítás 1 és 3 dB közötti, a csoportkésleltetés általában ± 350 ns-nél, az állóhullámarány pedig 1,2-nél kisebb.

A torzítások korrekciója

A TV adóberendezéseknek a kezdeti idők óta fontos része a nagyteljesítményű fokozatok nemlineáris torzításainak kompenzálása az előtorzítással. Az analóg adókban ezt az 1960-as évektől a középfrekvenciás (KF) fokozatban valósították meg. A KF linearitás-, vagy intermodulációs-korrektor a kimenőjel torzítását csökkentette, ami a jobb jellemzők elérése mellett lehetővé tette a nagyobb kimenő-teljesítményt és hatásfokot.

Az 1969-ben üzembe helyezett hazai fejlesztésű IV. sávi, közös kép-hang erősítésű TV adóba beépített klisztronra a gyártó cég korrektor nélkül 2 kW-ot ajánlott. A szabadalmazott KF korrektorral lehetséges volt a 4 kW elérése. Közös kép-hang erősítés esetén a vizsgálójel három összetevőt, a képvivőt, az oldalsávjelet és a hangvivőt tartalmazta. A korrektort ezzel a mérőjellel kellett beállítani és az intermodulációs termék szintjét az előírt érték alá csökkenteni. A korrektor az utána következő fokozatok és első sorban a végfokozat nemli-

3. ábra IV/V. sávi 8 körös sávszűrő jelleggörbéi: nem-kritikus esetben (fent) és kritikus esetben (lent)



4. ábra Derékszögű visszacsatolás

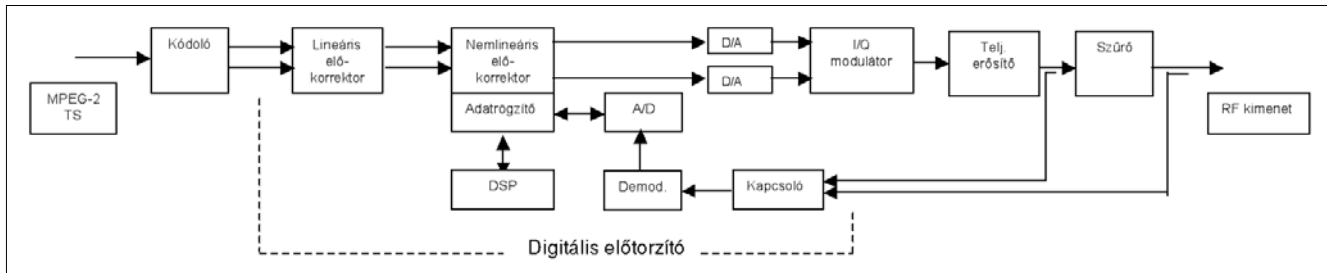
neáris karakterisztikájának inverzét valósította meg, ami a frekvenciasíkon azt jelentette, hogy azonos frekvenciájú, de ellenfázisú jeleket állított elő.

Az előtorzítókra vonatkozó, sokvivős rendszerekkel kapcsolatos kutatások több megoldást eredményeztek. A DVB-T adókban a derékszögű visszacsatolást (Cartesian Feedback) alkalmazzák (4. ábra). A kimenetről kicsatolt RF jel demodulátorát és a modulátort azonos oszcillátor táplálja. Az I és a Q alapsávi bemenőjeleket a demodulátorról érzékelőkkel a két műveleti erősítőben előtorzítják. Ezzel az erősítőnek mind az amplitúdó- (AM/AM), mind a fázistorzítását (AM/PM) korrigálják.

A derékszögű visszacsatolás digitális megvalósítását alkalmazza a Rohde und Schwarz cég adaptív és automatikus előtorzítójában [4,5]. A digitális megoldás az előtorzítás stabilitását eredményezi, továbbá a kezelés, a beállítás és az adatgyűjtés terén is számos előnnyel jár. A készülék alkalmas mind a félvezetős, mind pedig más, például IOT végerősítés adókhoz, így beépítik a cég tranzistoros DVB-T adóiba. A korrektort a meghajtófokozat kódolója utáni digitális szakaszban helyezik el (5. ábra).

A fejlesztők abból indultak ki, hogy a szélessávú teljesítményerősítők csak nemlineáris torzítást, a kimenőszűrők pedig csak lineáris torzítást okoznak, így célszerű volt a rendszert kettéválasztani. A nemlineáris torzítás korrekтора az erősítő kimenetéről, a lineárisa a szűrő utáni mérőpontról kapja a jelet. Az erősítő kimenetéről származó jel spektruma a csatorna szélességénél szélesebb sávú és ennek eredményeként javítja a csatornán kívüli spektrumot, növeli a vállcsillapítást. A két mérőponttól érkező és az átkapcsoló által továbbított jel az előtorzító bemenő jele. A jelet demodulálják – a demodulátort ugyanarról az oszcillátorról táplálják, mint az I/Q modulátort –, majd ezután A/D átalakítóval digitalizálják és a torzítatlan bemenőjellel együtt betöltik a memóriába.

A digitális jelfeldolgozó egység (DSP) kiolvassa a memóriából a kimeneti mérőpontokról és az előtorzító bemenetéről érkezett jeleket és összehasonlítja azokat. Ennek alapján körülbelül 10 és 200 másodperc közötti kiszámítja az új korrekciós görbéket, amelyeket tárol az előtorzító memóriájában. A lineáris és a nem-line-



5. ábra Digitális előtorzító

áris előtorzítás folyamatai egymást követik. A jelek ezután a D/A átalakítókön keresztül az I/Q modulátorba kerülnek, aminek a kimenetéről a DVB-T jel a teljesítményerősítőt hajtja meg.

A korrektor a lineáris torzítások csoportjában az amplitúdó frekvenciamenet ± 2 dB szélességű tartományát $\pm 0,25$ dB, a csoportkésleltetés ingadozását 500 ns-ig ± 10 ns ingadozásra tudja kiegyenlíteni. A nemlineáris torzítások esetén az amplitúdó-torzítás (AM/AM) 3 dB-es és a fázistorzítás (AM/PM) 45° -os tartományát tudja korrigálni. A lineáris torzításokat a szűrő saját jellemzői mellett a külső egységek, valamint a több adót összegező szűrő és az antennarendszer együttesen határozzák meg. A lineáris előtorzítás így a külső egységek hatását is kiegyenlíti.

A korrektort kézi (manuális) üzemmódban az előlapról, vagy számítógépről vezérelhetik. Automatikus üzemmódban a számítás és a korrekciós görbe beállítása nyomógombbal indítható. Adaptív üzemmódban a működés folyamatos. A torzítások tűréshatárai beállíthatók, ezek túllépésekor az előtorzító új korrekciót állít be. A jelátvitel, tehát az adó működése mindhárom esetben megszakítás nélküli. A tranzistoros teljesítményerősítők nemlineáris torzítása az időben állandó, ezért az előtorzítás mértéke nem változik. Más a helyzet az

adócsövek, az IOT esetén, ami szükségessé teszi az előtorzítás rendszeres, vagy folyamatos beállítását, az automatikus, vagy az adaptív üzemmódot. Ugyanígy változhat a hőmérséklet ingadozásakor a szűrő által okozott lineáris torzítás is.

Irodalom

- [1] MSZ EN 300 744: Digitális videoműsorszórás (DVB). A digitális földi televízió keretszerkezete, csatornakódolása és modulációja.
- [2] ETSI EN 302 296: Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for digital television broadcasting service, Terrestrial (DVB-T).
- [3] Dr. Bozóki Sándor, Gelencsér István, Krémer Szabolcs: Modulációs mérések a budapesti AM-mikro rendszer digitális csatornáján, Híradástechnika, 2002/5.
- [4] Reinhardt Scheide: Adaptive Digital Equalization – www.wabe.ca/papers/digital_eq.pdf
- [5] Peter Mühlbacher, Cornelius Heinemann: Automatic and adaptive precorrection of digital TV transmitters – News from Rohde&Schwarz, Nr.178.
- [6] DVB-T Transmission Primer www.advent.com.sg/files/white_paper.pdf

Hírek

A **HP és a Cisco Systems** a HP BladeSystem architektúrájába integrálják a Cisco kapcsolótechnológiáját, lehetővé téve a hálózat és a blade rendszer teljesítményének és megbízhatóságának optimalizálását. A Gigabit Ethernet kapcsolómodullal kibővített HP BladeSystem csökkenti az adatközponti infrastruktúra költségeit is. A rendszert hozzáigazították a Cisco Business Ready Data Center hálózati architektúrájához, így egységes hálózati szolgáltatási környezetet biztosít garantált szolgáltatásminőséggel és egyszerű felügyelettel, továbbá alacsonyabb induló kiadással jár, mint a vállalat hagyományos rack-be szerelt rendszerei, miközben az éves üzemeltetési költsége is csökken.

A **Cisco Self-Defending Network** (Önvédő Hálózat) elnevezésű biztonsági stratégiájának célja, hogy a vállalatok és intézmények hatékonyabban védhessék a hálózatba kapcsolt eszközeiket és alkalmazásait. Az „adaptív védelem” (Adaptive Threat Defense, ATD) stratégia többretegű dinamikus védelmet valósít meg. Emellett egyszerűbb architektúrát és olcsóbb üzemeltetést is jelent. A Cisco stratégiájában az első fázis az IP alapú és a biztonsági technológiák ötvözése integrált védelemmé. A második fázis a Network Admission Control, amely hatékonyabban képes felismerni és megakadályozni a veszélyforrásokat és alkalmazkodni hozzájuk. Az ATD fő összetevői: a veszélyforrások elleni összehangoltabb védelmet biztosító Anti-X védelem, az alkalmazásbiztonság, valamint a hálózatvezérlés és -elszigetelés.