

Ortogonalis frekvenciaosztású többszörös hozzáférés

DR. DÁRDAI ÁRPÁD, okleveles híradástechnikai szakmérnök

dardai.arpad@axelero.hu

Kulcsszavak: sokvívös moduláció, OFDM, fading- és interferenciaállóság, WLAN

A cikk a vezetékes, a vezeték nélküli és a mobil távközlés hozzáférési szakaszainak és a digitális műsorszórásnak fontos átviteli és modulációs eljárásával, a sokvívös modulációs eljárásokhoz tartozó ortogonalis frekvenciaosztásos többszörös hozzáféréssel (OFDM) foglalkozik. Ismerteti az OFDM átviteli és modulációs eljárások alapjait, a műszaki, rendszertechnikai, alkalmazási és értéknövelő megoldásokat. Számos alkalmazásban – különösen, ahol kiemelt szempont a zavarvédelem és az egyszerű, gyors, gazdaságos létesíthetőség – segíthet az OFDM.

A gyors fejlődése sok hasonló távközlési és informatikai alkalmazási területet nyitott meg. Ennek fontos eredményei: a többszörös hozzáférési- és a modulációs technika újszerű, hatékony módjainak kialakulása, a fénytávközlés elterjedése, minőségének lényeges javulása, árának csökkenése, az Internet Protokoll egyre növekvő alkalmazása.

Az utóbbi években dinamikusan fejlődő ágazat a különféle kód, vagy frekvenciaosztású többszörös hozzáférési eljárásokon alapuló technológiák. Ilyen az OFDM is, ez a 3G, 4G generációjú vezeték nélküli távközlőrendszerek hozzáférési szakaszaiban, a WLAN rendszerekben, a vezetékes távközlésben (például xDSL), és a villamos hálózati távközlésben (PLC), valamint a digitális műsorszórásban is egyre nagyobb szerepet kap.

Az OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) az ortogonalis frekvenciaosztásos hozzáférés egyike a digitális modulációs átviteli technikáknak. A távközlési csatornát nagyszámú, egyenlő osztású frekvenciasávokra osztja. Minden egyes részsávban egy alvívfrekvencia továbbítja a teljes információ egy részét. Az alvívök egymással kölcsönösen ortogonálisak (kölcsönösen függetlenek).

1. Az OFDM kialakulása, alkalmazások, nemzetközi tevékenység

Az OFDM többszörös hozzáférési eljárást kezdeti kutatás és kísérletek után az 1950-es évektől alkalmazták. Az 1960-as évekre kidolgozták az OFDM elméletét. 1970-es években az OFDM készülékek a diszkrét transzformációt (DFT – Discrete Fourier Transform) már gyors Fourier-transzformációval (FFT – Fast Fourier Transform) végezték. Az OFDM átvitelt az 1980-as években nagy sebességű modemekhez és digitális mobil összeköttetésekhez, és 1987-ben digitális hang műsorszóráshoz (DAB) is használták. Az 1990-es évektől szélessávú összeköttetésekhez, xDSL digitális előfizetői vonalakhoz, és DVB, HDTV célokra vezették be. Ma az OFDM eljárás a távközlés számos más területén is fontos: ETSI

BRAN, ETSI HIPERLAN/2, IEEE 802.11a, b (WiFi) és g szerinti WLAN eszközök, PLC, DMB, 3G, 4G mobil rendszerek.

Az OFDM technika, a szabványosítását és a bevezetését nemzetközi távközlési szervezetek (ITU-T,-R, ETSI) és programok (3GPP) segítik. Cél a távközlési infrastruktúra és a szolgáltatások összehangolt fejlesztése. Lényeges az ETSI, az IEEE és a COST kutatási és szabványosítási szerepe. E szervezetek és programok keretében dolgozták ki az UMTS, a BRAN, a WLAN, és a WiFi megoldásokat, a Bluetooth, és az ad hoc hálózati rendszereket.

2. Az OFDM eljárás

2.1. A zajos csatorna leírása

A mobil rendszerek tervezését alapvetően befolyásolja a rádiócsatorna fizikai és hullámterjedési viszonyai. A szokásos rádiócsatornában többutas hullámterjedés lép fel, így az adótól a vételi helyre érkező jel reflexiók összetevőkből áll. A mobil állomások mozgása miatt a hullámterjedési utak eltérő késleltetéssel és a megfelelő Doppler-frekvenciákkal jellemezhetők, ezekből meghatározhatók a rádiócsatorna frekvencia-szelektív tulajdonságai és időbeli szórása (idő diszperzió). A mobil állomás vételi viszonyait és a rádiócsatorna impulzusválaszát (CIR – Channel Impulse Response) a 1. ábra szemlélteti.

Az épületekről, járművekről, tereptárgyokról visszavert hullámok érkeznek a vevőantennához. A vételi helyre közvetlen hullám is érkezhet, de lehet olyan vételi pont is, amelyre csak reflektált hullám verődik. Legyen a hullámok közötti legnagyobb időkülönbség τ_{max} , a továbbított adatok szimbólum ideje T .

A reflexiók következtében egy vett szimbólumot

$$l = \tau_{max} / T \quad (1)$$

számú előző szimbólum befolyásolható, ahol l a szimbólumközi interferencia (ISI – Inter-Symbol Interference)

mértéke. Ennek a hatásnak a kiküszöbölése, illetve minimalizálása a vevőkészülék feladata.

A többitas rádiócsatorna erős szimbólum közötti interferenciát okoz főleg a nagy adatátviteli sebességű és a szélessávú alkalmazásoknál. Ezt figyelembe kell venni a zajos átviteli-rendszerek megvalósítása során.

2.2. Az OFDM eljárás kialakulása és alapelvei

Az OFDM eljárás alap gondolata

Az OFDM frekvenciaosztású átvitel és többszörös hozzáférés alap gondolata az, hogy egy nagy adatátviteli sebességű adatfolyam sok kisebb sebességű adatfolyamra osztható, amelyek alvivőinek modulációja egyedi, a többtől független, de azokkal egy időben történik. Az alvivők adatátviteléhez tartozó szimbólum idő az eredeti többszöröse lesz, így a részcsatornák átvitele ellenállóbb a csatorna többitas hullámterjedés okozta időszórásával és a zajokkal szemben. A vivőfrekvencia összetevők kölcsönösen ortogonálisak, innen az eljárás neve is: ortogonalis frekvenciaosztásos többszörös hozzáférés (OFDM).

A szimbólumok közötti interferencia csökkentése az OFDM eljárásnál

Az *I* interszimbólum interferencia (ISI) értéke a (4.1) összefüggés szerint

$$I = \tau_{\max} / T. \tag{2}$$

Egy *N* részcsatornás sokvivős rendszerenél egy részcsatorna adatátviteli sebessége

$$D_r = D / N, \tag{3}$$

a részcsatorna szimbólumideje pedig

$$T_r = 1 / D_r. \tag{4}$$

Helyettesítéssel adódik, hogy

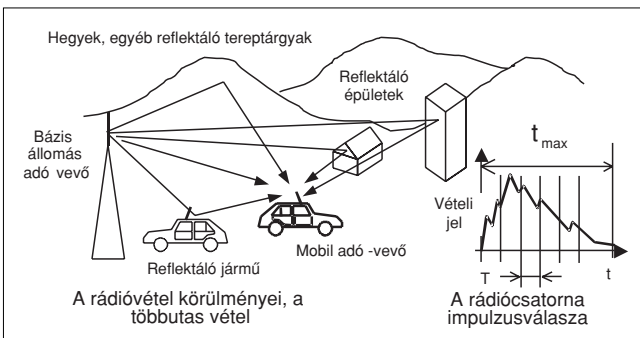
$$T_r = N \cdot T, \tag{5}$$

vagyis a részcsatorna szimbólumideje az eredeti szimbólumidő *N*-szerese, amiből a szimbólumközi interferencia (ISI) idő részcsatornára adódó értéke

$$I_r = \frac{\tau_{\max}}{T_r} = \frac{\tau_{\max}}{T \cdot N} \tag{6}$$

A hányados szerint a szimbólumközi interferencia az eredeti érték *N*-ed részére csökkent. Látható, hogy

1. ábra Többitas átvitel és a csatorna impulzusválasza



az OFDM átvitel a részcsatornák számának alkalmas megválasztásával a zavarok és a többitas terjedés káros hatásait jelentősen csökkentheti. Az alvivők *N* száma LAN hálózatoknál szokásosan 64-256, DVB rendszerenél 2000-8000.

Az OFDM jel sáv szélessége és spektruma

Az OFDM átviteli és multiplex eljárásnál az adatszimbólumok továbbítása, a szélessávú jelet sok, ortogonalis, keskenysávú jelösszetevőre bontva, a frekvencia-összetevők segítségével párhuzamosan viszi át. Az átvitel után az összetevők adatfolyamát egyesítik és visszanyerik az eredeti nagy adatátviteli sebességű, szélessávú adatfolyamot.

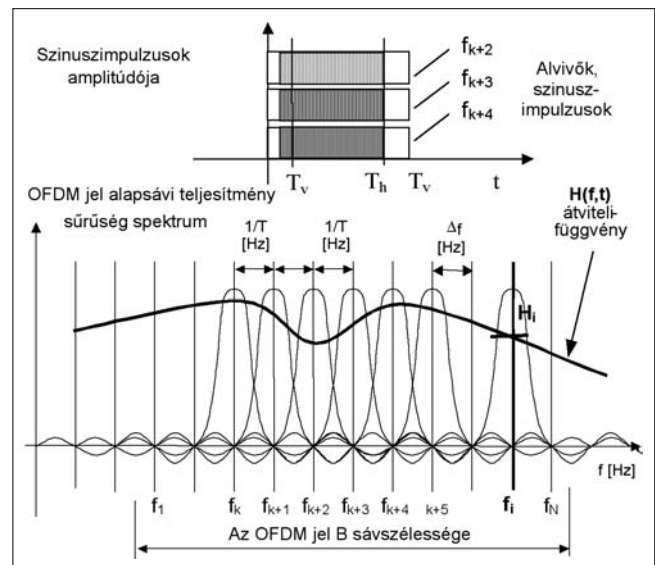
Az OFDM jel összetevőit, vagyis a szinuszipulzusokat, az OFDM jel spektrumát, és a *H* átviteli függvényt a 2. ábra szemlélteti. Az ábra szerint a *H* függvény a csatorna frekvencia és időfüggése következtében frekvencia és időfüggő; *H* = *H*(*f*,*t*).

Az OFDM szinuszcsoomagokban jelentkezik. Ennek időtartama a *T_r* szimbólumidő (részcsatorna szimbólumideje), a szinuszcsoomagok frekvenciái pedig *f₁*, *f₂*, ..., *f_i*, ..., *f_k*, ..., *f_N*, ahol az *f₁*, *f₂*, *f₃* stb. frekvenciák rendre az *f₀*, *2f₀*, *3f₀*, ..., *Nf₀* frekvenciáknak felelnek meg. Ha a vivők száma *N*, akkor az OFDM jel teljes *B* sáv szélessége a frekvencia-összetevők között lévő *f₀* = Δf = $1/T_r$ távolsággal:

$$B \approx N / T_r = N \cdot \Delta f \tag{7}$$

Szinuszcsoomag impulzus Fourier-transzformáltja, vagyis frekvencia-spektruma *sinx/x* alakú. Az egyenlő Δf alvivőtávolság esetén az alvivők spektruma nem lesz teljesen elválasztva. Az OFDM jel ortogonalis alvivőinek spektrumai átlapolódnak, de az összetevők spektrumainak maximumai a többi frekvencia összetevő spektrumának minimumaihoz esik. A spektrumok egyéb részei Δf távolságonként, a spektrumok zérus értékeinél kereszteződnek. A teljes OFDM spektrum kialakításánál arra törekszenek, hogy az alvivők spektrum energiájának döntő része egy adott sáv szélességen belül legyen, és a szomszédos frekven-

2. ábra Az OFDM jel spektruma



cia-összetevő sávjába minél kisebb energia jusson. Az alvív-spektrumok kialakítása következtében, a teljes OFDM jel B sávszélességű spektruma közel négyszögletes, így az OFDM jel spektrumhatékony.

A részcsatornák átviteli függvénye

Az OFDM jelet a $H=H(f, t)$ átviteli függvényű csatorna továbbítja. A 2. ábra szerint az OFDM jel egyedileg modulált, majd összegzett részelei párhuzamosan kerülnek továbbításra a számos keskenysávú részcsatornán. A H átviteli függvény a frekvencia és az idő függvénye, de a részcsatornák átvitelére nem a szélessávú jel átviteli függvénye érvényes, hanem csak a Δf sávszélességre eső, ami jó közelítéssel konstans. A keskenysávú részcsatornákra a jelátvitel összefüggése így:

$$R_i = S_i \cdot H_i + P_z \quad (4.9)$$

ahol

- R_i az i -edik csatorna vételi jele, az átvitel után nyert jel teljesítménye,
- S_i a részcsatorna adási jele, az átvitendő jel teljesítménye,
- H_i a i -edik részcsatornára érvényes keskenysávú átviteli függvénye,
- P_z az átvitel során a jelhez adódott Gaussi-fehér zaj teljesítménye.

A keskenysávú részcsatornában az adatszimbólum ideje már lényegesen nagyobb lesz, mint a csatorna maximális késleltetése. Frekvencia-szelektív rádiócsatornánál további előny az egyfrekvenciás szélessávú rendszerhez képest az, hogy a részcsatornára bontott szélessávú rendszer részcsatornás vevőiben jelentősen csökken a kiegyenlítő számítás igénye. Az OFDM eljárással megfelelő átvitel valósulhat meg az olyan szélessávú csatornában, amelyben a maximális hullámterjedési késleltetés sokkal nagyobb, mint a szélessávú adatfolyam szimbólum ideje.

Védőtávolságok alkalmazása az OFDM jelben

Az alvívökkel átvitt információk az alvívök ortogonalitása következtében szétválaszthatók. Az alvívök ortogonalitását a frekvenciák értékének és egymáshoz való viszonyának 2. ábra szerinti speciális választása eredményezi. A jó működéshez azonban a szimbólumidőkben védőtávolságok alkalmazása is szükséges.

A 2. ábrán feltüntetett T_v időmennyiség a védőintervallumot, és T_h a hasznos szimbólumidőt képviseli. A T_v a védőintervallum (GI – Guard Interval), amelyben a ciklikus előtag (CP – Cyclic Prefix) is helyet foglal, redundanciát, illetve többletadatot (overhead) jelent, ami a hasznos szimbólumidőt csökkenti. Szerepe mégis fontos, mert a védőintervallummal kiküszöbölhető, vagy jelentősen csökkenthető a szimbólum közötti interferencia (ISI), amely a többutas fadinges, idő-diszperzív rádiócsatornán történő átvitel során felléphet. Az OFDM jelben a ciklikus előtag előállításának egyik módja az, hogy az adott szimbólum (blokk) időfüggvényének meghatározott részét, rendszerint a szakasz végéről, a szimbólum elejére másolják, meghosszabbítva így a szimbólum lefolyását. Az előtagot az adott blokk időfüggvénye végének egy részéből képezik, bemásolva

ezt a védőintervallumba úgy, hogy ennek folytatása maga az adott adatblokk időfüggvénye lesz.

A többutas terjedéssel a vevőbe érkező összetevők közötti késleltetés különbséget az OFDM vevő kiegyenlíti. A védőintervallumnak legalább akkorának kell lenni, hogy az alatt a csatorna impulzusválasza (tranziense) az 1. ábra szerint lecsengjen, más szavakkal, a T_h és a T_v idők összege, vagyis az eredő T_e szimbólumidő, legyen lényegesen kisebb, mint a rádiócsatorna T_c koherenciaideje. A T_h hasznos szimbólumidőre a T_r választás is tehető, illetve a realizáció során más értelmezés és megoldás is lehetséges.

2.3. Az OFDM jelek előállításának matematikai alapjai

Az OFDM esetében fontos a gyors Fourier-transzformáció (FFT), amely a Fourier-módszerek családjába tartozik. A gyors Fourier-transzformáció áttekintésekor utalunk a Fourier-transzformáció (FT), illetve a diszkrét Fourier-transzformáció (DFT) és a mintavételezés alapjaira.

Diszkrét Fourier-transzformáció. Egy $f(t)$ függvény N darab $f(k)$ mintával, vagyis diszkrét időszorral is megadható, ahol $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$. Az $f(k)$ értékek valós és képzetes részekkel rendelkező komplex számok is lehetnek. Egy ilyen sorozat Fourier-transzformáltja frekvenciaértékeket, frekvenciamintákat ad. A frekvenciatartománybeli kép, a frekvenciaspektrum is N mintát tartalmaz.

A diszkrét függvényértékek Fourier-transzformáltja a diszkrét Fourier-transzformációval:

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} ; \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

ahol $F(n)$ általában szintén komplex sorokat képezhet. Az inverz diszkrét Fourier-transzformált:

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j \frac{2\pi kn}{N}} ; \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

Mintavételezés. A diszkrét Fourier-transzformáció alkalmazása és a jelek feldolgozása során követni kell a Shannon-féle mintavételi szabályokat és a Nyquist-kritériumokat ($f_{mv} \geq 1/T_{mv} = 2f_{max}$, $f_{mv} = 2f_{max}$, $f_N = 2f_{max}$). E szerint egy sávhatárolt jel, esetünkben egy modulált jel időfüggvénye egy szimbólumának T ideje alatt, elegendő $\Delta t = 1/2B = T_{mv}$ periodikus gyakorisággal N db ($0, 1, 2, \dots, N-1$) pillanatnyi mintát venni. Itt Δt a mintavételi időköz, B a jel sávszélessége és $f_{mv} = 1/\Delta t$ a mintavételi frekvencia. Az így nyert idősorozathoz a frekvenciatartományban szintén N db ($0, 1, 2, \dots, N-1$) frekvencia összetevő, frekvenciaminta tartozik.

Az időfüggvényből transzformált frekvencia értékek sorának 0 -adik eleme az időfüggvény átlaga (DC – Direct Current), az első eleme az első harmonikus, és a többi összetevő frekvenciája az elsőnek harmonikus, az adott index szerint.

A fentieket alkalmazva, a B sávszélességben elhelyezkedő, N tagú frekvenciasor (a szemléletesség végett a sor

képzetes része legyen zérus) az $N/2$ -edik (az f_N Nyquist-frekvencia felének megfelelő) mintára szimmetrikusnak tekinthető (a pozitív, ill. negatív frekvenciák analógiájára). Az N -edik minta, illetve a megfelelő frekvencia a Nyquist-frekvencia.

Ebben a szimmetrikus esetben, a Nyquist első kritériuma szerint elegendő a frekvenciatartománybeli N minta közül az első $N/2$ -edik mintáig figyelembe venni a spektrumot. Szimmetrikus esetben ez az a frekvencia, illetve a megfelelő frekvencia minták, amelyeknek létezni kell ahhoz, hogy az inverz diszkrét Fourier-transzformáció (IDFT) segítségével az adatjeleket hibamentesen visszaállíthassuk. Ennek ismeretében, a $B = N\Delta f$ sáv szélességű OFDM jelre a szükséges mintavételi idő $\Delta t = 1/B = 1/N\Delta f$.

Sávátlapolódás, Aliasing. A mintavételezés során az alapsávi spektrum mellett megjelenik a mintavételi frekvenciára (és harmonikusaira) szimmetrikusan, az alapsávnak megfelelő alsó és felső oldalsáv is. Alul mintavételezésnél ($f_{mv} < f_N$) az alapsáv és a mintavételezési frekvencia alsó sávja átlapolódik (Aliasing). Az alapsávban idegen összetevők jelennek meg, ami az adatátvitelnél átviteli hibákat okoz.

Gyors Fourier-transzformáció. A gyors Fourier-transzformáció (FFT) olyan algoritmus, amely egy valóságos (idő)-függvényhez tartozó diszkrét adatok véges készletéből Fourier-transzformáltat ad. Az adatok periodikus mintavétellel keletkeznek. Az FFT eljárás a folyamat frekvencia összetevőit adja. Az FFT az inverz transzformációra is megoldás, így a frekvencia adatokból az eredeti függvény egyértelműen visszaállítható.

A diszkrét Fourier-transzformációval adódó idő- és frekvenciasorok komplex értékűek is lehetnek. Komplex sorokkal végzett számítógépes műveletek – különösen nagy sorokkal – időigényesek. A Fourier-transzformáció N^2 komplex szorzást és összeadást igényel. A számítási idő tetemes, mert a sorok tagjainak számával négyzetesen arányos. Kifejlesztettek lényegesen kisebb számítási idejű algoritmusokat is, ezek gyűjtő neve gyors Fourier-transzformációnak (FFT), amelyek azonos eredményre vezetnek, mint a DFT. Az FFT algoritmusok számítási időigénye közelítőleg a sorok tagjai száma és számuk kettesalapú logaritmusának szorzatával arányos.

A számítások érvényessége. A diszkrét és inverz diszkrét Fourier-transzformáció a periodikus függvényekre értelmezett Fourier-soroknak felel meg. Szigorúan nézve, a modulált jelek nem periodikusak, egy-egy T szimbólumidőre a diszkrét Fourier-transzformáció, illetve inverz transzformáció, a gyakorlatban mégis jól használható. Ennek oka, hogy egy T időtartamú, nem periodikus jel megadható frekvenciatartománybeli mintákkal, amelyekből az időfüggvény teljesen visszaállítható. A számításokhoz használhatók a Fourier-transzformáció, komplex sorok, komplex számok tételei.

Alkalmazások. Az FFT eljárás alkalmazásai közül: matematika és fizika, lineáris rendszerek analízise, erősen zajos, illetve zaj alatti jelek hatékony visszaállítása. Az esetekhez a gyors Fourier-transzformáció igen hatékony eszköz. Jellemzője, hogy a megoldandó problémákat könnyebben kezelhető alakra hozza.

3. Az OFDM adási és vételi jel

Az OFDM adási alapsávi jel előállításának elve

Az OFDM megoldás rész-frekvenciasávjai a T_r szimbólum időben egész számú periódusidőkkel helyezhetők el. Az alvivők frekvenciája a $\Delta f = 1/T_r = f_0$ frekvenciatávolság, illetve frekvencia egészszámú többszöröse (harmonikusai), vagyis $f_0, 2f_0, 3f_0, \dots, nf_0, \dots, (N-1)f_0, Nf_0$. Az alvivők a T_r időben, illetve T_v védőintervallummal kiegészített részében is ortogonálisak.

Az OFDM jel ortogonális összetevőinek és az átlapolódó spektrumoknak az előállítását az adó és a vevő oldalon digitális jelfeldolgozó eljárások végzik. A digitális moduláció a szinuszos jelek három paraméterét modulálhatja: amplitúdó, frekvencia és fázis (ASK, FSK, PSK). Az OFDM átvitelnél gyakori az ASK és a PSK moduláció kombinációja (APSK) vagy a QAM moduláció. Az OFDM adási jel alapsávi időfüggvénye:

$$s_{as}(t) = (A_k + jB_k) \cdot e^{j2\pi f_v t} = M_k \cdot e^{j2\pi f_v t} \quad (5.1)$$

ahol $e^{j2\pi f_v t}$ az f_v frekvenciájú vivőhullám, és $M_k = (A_k + jB_k)$ a komplex digitális moduláció a k -edik adatblokkban. A modulált alvivők átvitele az f_v vivő segítségével történik, amelyhez az alvivők frekvenciái hozzáadódnak (transzponálás, konverzió a kívánt sávba). Így a frekvenciák értékei rendre $f_v + f_0, f_v + 2f_0, f_v + 3f_0, \dots, f_v + nf_0$ lesznek. Az f_v vivő elvileg lehet a végleges RF vivő, de az adott készüléktől függő jel- és frekvencia-feldolgozás módja szerint lehet egy közbenső segédvivő is. A vivő az alvivők (részsávok) helyére nézve a frekvenciatengelyen additív, vagyis a vivő az OFDM jel alvivőit, illetve alapsávi spektrumát a vivő értékével eltolja a kívánt áteresztő sávba.

Az információ átvitele az alvivők amplitúdójának és fázisának modulációjával történik. A modulált alvivők összege adja az alapsávi OFDM jelet. Az alapsávi OFDM jel időfüggvényének matematikai összefüggése:

$$s_{as}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \{a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t)\} \quad (5.2)$$

Az (5.2) összefüggés szerint az s_{as} alapsávi jel előállításához N darab alvivő generátor és N darab alvivő modulátor szükséges, a teljes modulált időfüggvény a külön-külön, de egyidejűleg modulált alvivők időfüggvényeinek összege. Az időfüggvény a külön-külön modulált alvivők előállítása és összegzése helyett, a nagyszámú modulátorok készítése nélkül, a Fourier-transzformáció eljárásával is generálható.

Az OFDM jel generálása az adóban, moduláció

Előállítandók az alapsávi OFDM jel időfüggvényéből az egyidejű párhuzamos adatok, majd az alvivők modulálásával a modulált alvivők alapsávi időfüggvényeit, illetve az időfüggvények frekvenciaspektrumait.

Ezt követi a modulált analóg adatjelek analóg-diszkrét átalakítása a mintavételi értékekkel a $\Delta t = 1/B = 1/N\Delta f$ mintavételi időpontokban. Az alapsávi adási OFDM jel diszkrét értékei így:

$$s_{as\ k,i} \cong \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} m_{k,n} e^{j \frac{2\pi n i}{N}} ; \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (11)$$

ahol az $s_{as\ k,i}$ értékek a k -edik adatblokkhoz tartozó időfüggvény i -edik mintavételi értéke, és $m_{k,n}$ a k -edik adatblokkhoz tartozó n -edik rész-időfüggvény (alvivő) komplex modulációs szimbóluma, $m_{k,n} = (a_{k,n} + jb_{k,n})$ és $\Delta f = 1/T_e$, a szimbólumidő reciproka.

Az (5.3) kifejezés megfelel az inverz diszkrét Fourier-transzformációnak. Végrehajtása, az időfüggvény minták előállítása a modulációs szimbólumokkal, az inverz gyors Fourier-transzformációval (IFFT – Inverse Fast Fourier-Transformation) lehet. A mintákból a D/A konverter diszkrét-analóg átalakítással analóg jelet állít elő, amelyet a kívánt sávba konvertálva kisugároz.

Az adatok visszanyerése az OFDM jelből, demodulálás

Az $s_{as}(t)$ alapsávi jelből az a_n, b_n ($n = 0, 1, 2, \dots, N$) modulációs tartalom, vagyis a szimbólum információ a Fourier-transzformációval visszaállítható:

$$a_n = \int_0^T s_{as}(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt, \quad (12)$$

$$b_n = \int_0^T s_{as}(t) (\sin(2\pi n f_0 t)) dt$$

Az OFDM jel demodulálása a következők szerinti. Az f_v sávjában levő OFDM jelet a $2\pi f_v$ vivő körfrekvenciájú koszinuszos, illetve szinuszos jellel szorozva, aluláteresztő után az alapsávi jelet kapjuk. Az I (In Phase) jelet koszinuszos (cos) függvényvel, a Q (Quadrature) összetevőt szinuszos (sin) függvényvel szorozva nyerhetjük. A komplex alapsávi jel:

$$s(t) = s_I(t) + js_Q(t) \quad (13)$$

Az (5.1) és az (5.3) egybevetéséből

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} m_n \bullet e^{j2\pi n f_0 t} \quad (14)$$

ahol $f_0 = 2\pi/N$. Az (5.6) megadható diszkrét értékekkel a következő alakban is (15):

$$s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} m(k) e^{j \frac{2\pi k n}{N}} ; \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

Az (5.7) összefüggés alapján, diszkrét Fourier-transzformációt alkalmazva a modulációs adatszimbólumok visszanyerhetők (16):

$$m_n(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{-j \frac{2\pi n k}{N}} ; \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

Ez a rádiócsatornán történő átvitel, majd vétel és detektálás után, az OFDM vevő feladata. A valóságos esetekben az eredő szélessávú adatfolyamot visszaállító diszkrét Fourier-transzformációhoz a gyors Fourier-transzformáció használatos.

4. Az OFDM jel előállításának és demodulálásának tömbvázlata

Az OFDM átvitel tömbvázlata

Az OFDM jel előállítása a 3. pontban részletezett matematikai összefüggések alapján, a 3. ábrával szemléltethető.

Adjunk az ábra szerinti OFDM modulátor bemenetére szélessávú, nagy adatátviteli sebességű bináris digitális adatfolyamot. A soros bináris adatok OFDM rendszeren történő átvitelének főbb lépései a matematikai összefüggések és a szükséges jelfeldolgozási feladatok alapján az alábbiak:

- kódolás (FEC), átszövés (interleaving),
- soros-párhuzamos átalakítás, majd
- modulálás, ezt követően
- inverz Fourier-transzformáció és a védőintervallum beiktatása
- párhuzamos-soros átalakítás, majd diszkrét-analóg konverzió,
- az OFDM jelek adása, átvitele, vétele, és visszaalakítása.

A modulátor működése

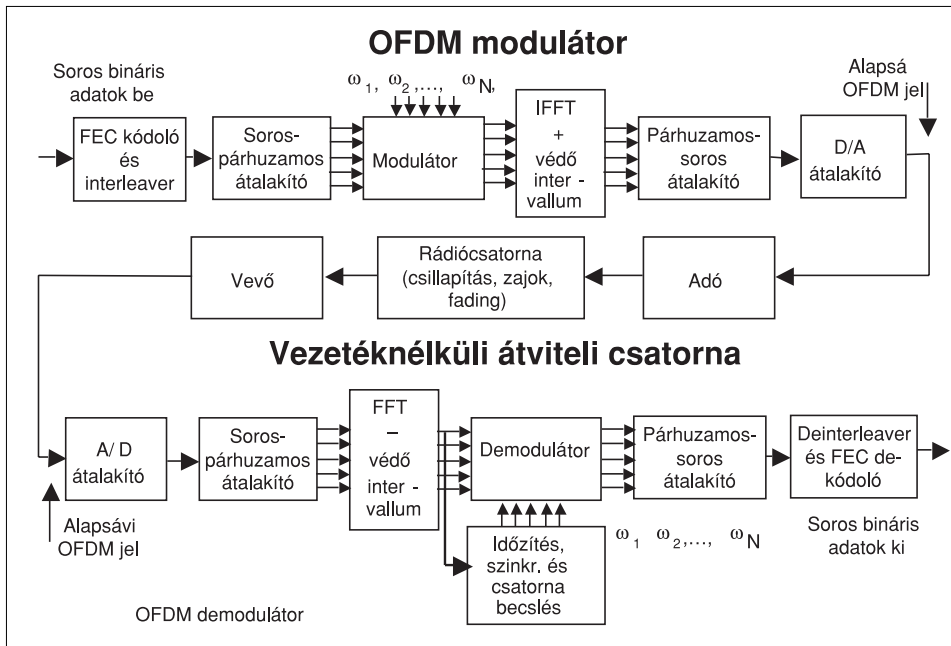
Kódolás és átszövés. Az OFDM modulátor a szélessávú adatfolyamot kódolja (FEC, konvolúciós kódolás) és átszövés (átlapolás, interleaving) eljárásnak veti alá. A kódolás (pl. Reed-Solomon) feladata az átviteli hibák elleni védelem, az átszövés pedig a csomós hibák hatását csökkenti. Az átszövés történhet mind a frekvencia-, mind az időtartományban.

Soros-párhuzamos átalakítás. A kódolás és átszövés után az OFDM eljárás a szélessávú adatfolyamot nagyszámú, kisebb sebességű bináris adatfolyamra, rész adatcsatornára bontja.

Moduláció. A részcsatornákra bontás után a részadatcsatornák modulációja következik. A megoldástól függően, PSK (Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation), APSK (Amplitude and Phase Shift Keying), vagy más moduláció alkalmazható. A modulációs eljárások szintje lehet M (páros egész szám), és a moduláció lehet differenciális, vagy nem differenciális, a rendszertől függően.

Inverz Fourier-transzformáció és a védőintervallum beiktatása. A moduláció létrehozta azt a frekvenciaspektrumot, amelyet az inverz diszkrét Fourier-transzformáció a megfelelő időfüggvényé, illetve az időfüggvény mintavételi pontjaivá alakít át. A mintavétel gyakorisága a 2. ábra és a (4.8) összefüggés alapján $\Delta t = 1/B$. Az inverz Fourier-transzformáció, a modulátor kimenetén megjelenő digitális jel spektrumának megfelelően, az inverz diszkrét Fourier-transzformációval (IDFT), illetve az inverz gyors Fourier-transzformációval (IFFT) végezhető el. Az IFFT egység tehát, a részsávok spektrumaiból a részsávok időfüggvényeit állítja elő.

Az egység adatblokkonként védő intervallumot (GI – Guard Interval, CP – Cyclic Prefix, Cyclic Guard Period) is beiktat a jelbe, ami a többutas hullámterjedés okozta fading hatását csökkenti. Egy-egy adatblokk a soros adat-



3. ábra Az OFDM átvitel blokkvázlata

folyamból egy-egy lépésben párhuzamos adatokká alakított adatmennyiség. Az adatstruktúrának más kialakítása is lehetséges.

Párhuzamos-soros átalakítás, majd diszkrét-analóg konverzió. A párhuzamos-soros átalakító feladata, hogy a bemenetein jelentkező, párhuzamosan jelen levő részsávok visszaállított időfüggvényeinek diszkrét mintavételi értékeit sorosan rendezze (időfüggvények összegzése, szuperpozíciója). A diszkrét mintavételi értékeket folytonos időfüggvénné alakítja a D/A egység. Kimenetén az alapsávi analóg OFDM jelet nyerjük.

Az OFDM jelek adása és átvitele. Az OFDM modulátort az RF adó követi. Az adó az alapsávi OFDM jelet egy megfelelő modulációval és transzponálással a rádiófrekvenciás vivőre helyezi, és a kívánt teljesítményű RF jelet az adóantennáról kisugározza. Az RF jelek vételét a rádiócsatornán történő átvitel után az OFDM vevő és demodulátor végzi.

A demodulátor működése

Az OFDM vétel az adás fordítottja. A fontosabb működési fázisok az alábbiak.

Az OFDM jelek vétele. A vevő RF fokozatai a kívánt frekvenciájú OFDM jelet veszik és kiválasztják. A keverés és transzponálás révén a jel a KF egységbe jut. A KF egység kimenetén megjelenik a KF sávi, sávhatárolt OFDM jel, illetve spektrum.

Analóg-diszkrét átalakítás, soros-párhuzamos felbontás. A KF egység kimenetéhez csatlakozó A/D egység a KF sávi OFDM spektrum időfüggvényét mintavételezi és előállítja a diszkrét digitális adatfolyamot, illetve a megfelelő diszkrét időfüggvény értékeket. Ezt követi az adatfolyam felbontása párhuzamos részcsoportokra.

Gyors Fourier-transzformáció. A részcsoportok jeleinek időfüggvényeiből a vevő FFT egysége gyors Fourier-transzformációval a modulált jelek frekvenciaspektru-

mat állítja elő, amelyeket a demodulátorok demodulálnak.

Demoduláció és párhuzamos-soros átalakítás. A demodulátorok koherens vagy PSK, AQAM stb. demodulátorok, amelyek bináris adatokat adnak. A demodulált, párhuzamos részcsoportok adatait a párhuzamos/soros átalakító soros adatfolyammá képezi.

Inverz-átszövés, FEC dekódolás. Ezután következik az inverz-átszövés (deinterleaving) és a FEC dekódoló. A deinterleaver (lehet idő- és frekvenciatartománybeli) visszaállítja az eredeti adatsorrendet, megszüntetve, illetve csökkentve az esetleges csomós hibák

hatását. Az ily módon előállított adatsorozatot a FEC kódolásnak megfelelően dekódolják. Az adótól küldött adatszimbólumok becslésére Viterbi-algoritmus használható. A Viterbi-dekódoló a küldött szimbólumszekvenciához legközelebbi szimbólumsorozatot választja ki.

Időzítés, szinkronizálás, csatornabecslés. A vevőkészülék feladata a vivők időzítése, szinkronizálása, a csatorna becslése, a szükséges csatornakegyenlítések elvégzése is.

5. Az OFDM adás előnyei és hátrányai

Fontosabb előnyök:

- a frekvenciaspektrum hatékony felhasználása a részspektrumok átlapolódásával,
- a részcsoportok átvitele a szimbólumidőkben gyakorlatilag fadingtől mentes,
- a részcsoportok ortogonalitása és a védőidő az interszimbólum interferenciát jelentősen lecsökkenti,
- az átvitel során technikai védelemet ad, detektálása speciális technikát igényel,
- megfelelő csatornakegyenlítővel és átszövéssel az átviteli biztonság tovább növelhető,
- a részcsoportokra egyszerűbbé válik a csatorna kiegyenlítése, mint a teljes sávra, mint az egyvivős esetben,
- a gyors Fourier-transzformációs eljárás csökkenti a számítási műveletek számát, ez kedvező a modulátor és a demodulátor megvalósíthatóságára,
- differenciális modulációval a csatornakegyenlítő egyszerű, esetenként szükségtelen,
- az időszinkronizálás és a mintavételezés egyszerűbb, mint az egyvivős rendszereknél.

Hátrányos tulajdonságok:

- az OFDM jel amplitúdó eloszlása zajszerű, nagy dinamikus, a teljesítményerősítők nagy csúcs-átlag teljesítményviszonnyal működnek, ez az erősítőkkel szemben nagy követelményeket támaszt,

- az OFDM átvitel a frekvenciapontosságra és -megváltozásra sokkal érzékenyebb, mint az egyvívós rendszer, a diszkrét Fourier-transzformáció sajátosságai miatt.

A jellemzők vizsgálata az előnyök túlsúlyát mutatja. A hátrányok hatása a korszerű jelfeldolgozási módszerekkel és a modern áramkörtechnikával kiküszöbölhető.

Az OFDM eljárás összefoglaló értékei és értéknövelő képességei

Az OFDM moduláció előnyös mert:

- *Hálózat létesíthető*: infrastruktúrális, ad hoc, vagy vegyes távközlőhálózatok.

- *IP- és multimédia-alkalmasság*. Kedvező a fejlett IP alapú kommunikációhoz, a beszédcélú és a multimédiás alkalmazásokhoz, az adaptív alkalmazási feltételekhez.

- *Csatlakoztathatóság, együttműködés, alkalmazások*. Az OFDM alapú távközlés rendszereinek, alrendszereinek kialakítása lehetővé teszi a hálózatok, alhálózatok és terminálok jó együttműködését, a korszerű távközlési szolgáltatásokat.

Irodalom

[1] Dr. Pap László:

A hírközlő csatornák fizikai védelme, szórt spektrumú eljárások.
Híradástechnika, XLVI. évf., 1995. március

[2] Dr. Pap L.–Dr. Dárdai Á.:

SST-CDMA rendszerek tulajdonságai.

Cellás rendszerek összehasonlítása.

Híradástechnika, XLVI. évf., 1995. április

[3] Sklar, Bernard:

Digital Communications.

Fundamentals and Application.

Prentice-Hall, Englew. Cliffs, N.J. 1988.

[4] Stallings, William:

Handbook of Computer Communications Standards.

Local Area Network Standards. Vol. 1,2,3, 2nd Edition.

Howard W. Sams and Company Carmel, USA.

[5] Cooley, J. W.-Tukey, J. W.:

An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series.

Mathematics of Computation, 1965.

[6] Brigham, E. Oren:

The Fast Fourier Transform and its Application.

Englewood Cliffs, Nj, Prentice Hall Inc., 1988.

[7] Casas, E. F.–Leung, C.:

OFDM for Data Communication Over Mobile Radio FM Channels – Part I:

Analysis and Experimental Results.

IEEE Transactions on Communications,

Vol. 39. No.5., May 1991.

[8] Casas, E. F. - Leung, C.:

OFDM for Data Communication Over Mobile Radio FM Channels – Part II: Performance Improvement.

IEEE Transactions on Communications,

Vol. 40. No.4., April 1992.

Hírek

A **Siemens PenPhone** egy háromsávós mobiltelefon és egy toll keveréke. Az író tollat formázó, 14 centiméteres „tollofon” képes felismerni és elmenteni a kézzel írott számokat és üzeneteket – függetlenül attól, hogy mire jegyeztük le azokat. Ha éppen nem esik a kezünk ügyébe semmilyen írófelület, a beépített hangfelismerő is aktiválni tudja a készüléket. Emellett kihangosítót, valamint hangvezérlő funkciót is beleépítettek, és Bluetooth-szal kapcsolódik kézi számítógépünkhöz vagy a fejhallgatóhoz.

A **Bluetooth Advanced Pen Input** MMI lehetővé teszi, hogy igazán kreatív MMS-üzeneteket készítsünk. Segítségével belerajzolhatunk vagy jegyzetelhetünk a képüzenetünkbe. A rajzokat és a szavakat automatikusan olyan méretűvé alakítja a készülék, hogy MMS-ben elküldhető legyen, így aztán sem szab gátat a fantáziánknak.

Az **Assisted Global Positioning System** (A-GPS) technológiát a G3 mobilok számára fejlesztette ki a Siemens. A GPS vevő és a cellurális hálózat közötti kommunikációra épülő technológia lehetővé teszi a helymeghatározáshoz kapcsolódó alkalmazások szélesebb körű használatát. Így a telefon képes lesz navigációra, flottairányításra, nyomkövetésre, de kipróbálhatjuk rajta az interaktív, többszereplős játékokat is. Ezentúl pedig már nem fordulhat elő velünk az sem, hogy eltévedünk egy idegen városban, hiszen a telefonunk mindig pontosan tudni fogja, hol vagyunk.