

# Jelzőhang felismerés és digitális moduláció kis teljesítményű jelfeldolgozó processzorral

**Wühl Tibor, Gyányi Sándor**

wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu gyanyi.sandor@kvk.uni-obuda.hu Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Híradástechnika Intézet, 1084 Budapest, Tavaszmező u. 15. – 17.

---

*A távközlő és informatikai rendszereknél fontos elvárás a kompatibilitás, ezért a napjainkban megvalósított hálózatoknak képesnek kell lenniük a régebbi rendszerekkel való együttműködésre. Ez a kompatibilitási igény az új rendszereket alkotó berendezéseknél jelentkezik, ezért a modern telekommunikációs eszközök gyakran tartalmaznak analóg interfészeket. Ebben a cikkben egy tipikusan ilyen kapcsolódást lehetővé tevő eljárás csomagot ismertetünk, az egyes algoritmusokat úgy készítettük el, hogy azok kis teljesítményű, fix pontos számábrázolást használó jelfeldolgozó processzorral megvalósíthatók legyenek. A bemutatott DSP algoritmusok a következők: jelzőhang felismerés, digitális modulációs és demodulációs módszer.*

---

*Kulcsszavak: Digitális Jelfeldolgozás; Digitális moduláció; Jelzőhang detekció.*

---

## Tone detection and digital modulation with digital signal controller

**Tibor WÜHRL, Sándor GYÁNYI**

wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu gyanyi.sandor@kvk.uni-obuda.hu Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Híradástechnika Intézet, 1084 Budapest, Tavaszmező u. 15. – 17.

---

*Compatibility is mainly required in Telecommunication and Informatics systems. In this case the networks that realised nowadays have to be able to cooperate with the old developed systems. The necessity of compatibility come out in new system devices, so the modern telecommunication equipment are frequently connected to the older analogue systems, through analogue interfaces. In this article we take a review of a typical connection, and introduce DSP algorithms which realizable digital signal controller (DSC). The illustrated DSP algorithms are included tone detection, digital modulation and demodulation methods.*

---

*Keywords: Digital Signal Processing; Digital Modulations; Signal detection*

---

## 1 Bevezetés

Ebben a cikkben egy analóg környezetben működő, digitális kommunikációs interfész megvalósítás fontosabb lépéseit ismertetjük. Az interfész az UIC<sup>1</sup> szabvány [1] elemeire épül, ahol feladat bizonyos jelzőhangok felismerése, jelzőhangok küldése, valamint FSK üzenetek vétele és adása. A cikknek nem célja a teljes rendszer ismertetése, hanem elsősorban az egyes funkciók és azok digitális jelfeldolgozással történő megvalósított algoritmusokra és azok megvalósításának bemutatására koncentrálnunk. Az algoritmusok tervezésénél fontos szempont volt, hogy azok kis teljesítményű eszközzel, hatékonyan megvalósítható legyen. Az algoritmusokat

---

<sup>1</sup> Union Internationale des Chemins de fer (International Union of Railway)

assembly nyelven kódoltuk és dsPIC33E [2] sorozatú DSC<sup>2</sup>-n futtattuk, teszteltük. A DSP rutinok timer ütemezett task-ként futnak.

Külön fejezetben mutatjuk be a jelzhangok generálását, a digitális modulációt, a digitális demodulációt és a jelzhang felismerés algoritmusát.

## 2 Jelzhang generátor

A vezetékes interfészekben, valamint digitális kommunikációs csatornáknál gyakran előfordul, hogy a hangfrekvenciás tartományba eső jelzhangokat, esetleg mérőhangokat [3] kell előállítani. Ezek a jelzhangok általában egy harmonikus jel, például UIC szabadságjel, PSTN tárcsahang vagy csengetés visszhang stb. illetve több harmonikus komponens összegéből álló jelek, például DTMF<sup>3</sup>. Egy harmonikus jel valós időben történő legenerálása egy kis számítási teljesítményű controller számára nehézkes feladat, hiszen trigonometrikus függvények értékeinek kiszámítására nincsenek felkészítve. Természetesen nem is ez lenne a helyes megoldás, hiszen az egyes függvény értékek előre kiszámíthatók és a controller programmemória területén, mint megváltoztathatatlan, csak olvasható adat letárolhatók. A letárolt függvény értékeket táblázatba szervezzük, akkor a táblázatból, úgynevezett look-up table-os módszerrel valós időben, mint jel minták, kiolvashatók.

Hatékony algoritmus, ha például egy szinusz hullám  $N=256$  mintáját előre kiszámítjuk és eltároljuk. A táblázatból kiolvasást egy Timer hardver segítségével ütemezzük, a Timer által definiált mintavételi időközönként ( $f_s=8000\text{Hz}$  mintavételi frekvenciánál  $T=125\mu\text{s}$ ). A generált jel frekvenciáját úgy tudjuk meghatározni, hogy a táblázatból csak minden "k"-adik elemet olvassuk ki. A  $k=1$  esetén kapjuk a generátorral előállítható minimális frekvenciájú harmonikus jelet, ami  $f_s=8000\text{Hz}$  esetén és 256 elemű táblázat alkalmazásával  $8000/256\text{Hz}$  vagyis  $31,25\text{Hz}$ . Ez az alsó határfrekvencia egyben a generátor hangolhatóságának lépésköze, ami nagyobb elemszámú, táblázattal finomítható. A generált jel frekvenciája tehát a következő összefüggéssel adható meg:

$$f_{jel} = \frac{f_s \cdot k}{N}$$

A fentiek alapján, ha egy 1kHz frekvenciájú jelet kívánunk előállítani, a  $k=32$  olvasási lépésközzel kell az algoritmust felparaméterezni.

## 3 Digitális modulátor

A digitális modulátor megvalósítás szervesen kapcsolódik a az előző fejezetben ismertetett bemutatott jelzhang generátor megvalósításhoz, hiszen most is harmonikus jelek generálását kell megvalósítani. Most is célszerű a look-up táblás megvalósítás a hatékony valós idejű működés okán.

Egy digitális modulátor kimenetét szimbólumok sorozata hagyja el a továbbítani kívánt bit, vagy bitsorozat függvényében. Egy egyszerű, két állapotú FSK esetén a szimbólumkészlet két elemből áll, az egyik elem az átvinni kívánt logikai '0', a másik pedig a logikai '1'-hez rendelt.

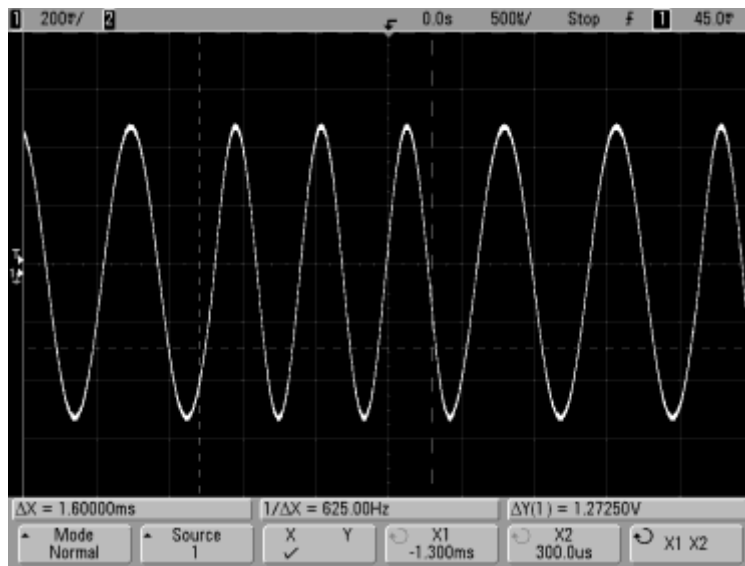
A fentiek alapján vázolt FSK modulátor valójában két különböző frekvenciájú jelzhang kapcsolgatásra egyszerűsödik. A probléma a szimbólum határon áll elő, amikor az egyik szimbólumról váltunk a másikra és viszont. Ez az átkapcsolás káros tranziensek forrása lehet és nemkívánt spektrális komponensek megjelenését idézi elő. A nemkívánt összetevőktől digitális szűréssel szabadulhatunk meg, de jelentős DSP erőforrást igényelhet a művelet.

Hatékonyabb megoldás, és a kis számítási kapacitással rendelkező eszközön történő realizálást megkönnyíti, ha a szimbólum váltást és az ezzel kapcsolatosan kiküldött minta értékét úgy alakítjuk, hogy az "ugrást" nem eredményez az időtartományban megfigyelt jelben. Ez úgy valósítható meg, hogy a jelgenerátor algoritmus lépésköz ( $k$ ) felparaméterezésén módosítunk, anélkül, hogy megállítanánk a minta olvasási szekvenciát. A lépésköz emelésével (jelen esetben a  $k$  változó inkrementálásával) a generált harmonikus jel frekvenciáját emeljük, míg a lépésköz csökkentés a generált jel frekvenciájának csökkentését eredményezi.

---

<sup>2</sup> DSC – Digital Signal Controller  
<sup>3</sup> Dual Tone Multi Frequency

A következő ábrán egy FSK minatsorozat időtartománybeli képét láthatjuk:

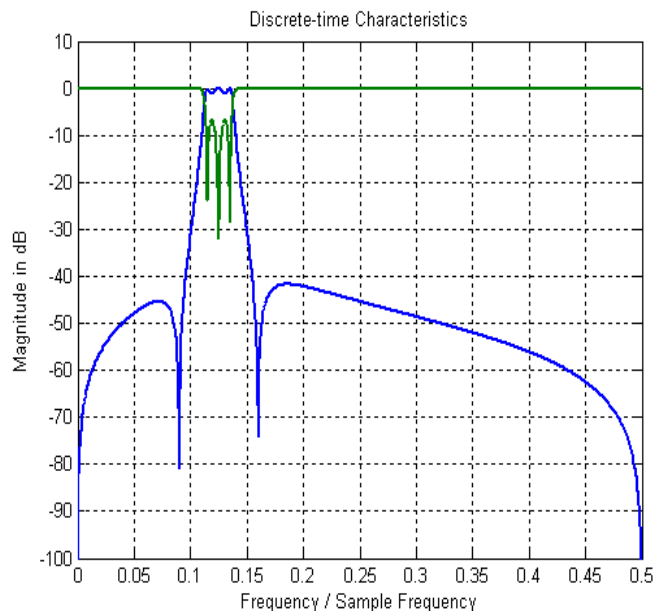


1. ábra  
FSK jel az idő függvényében – szimbólumok közti folytonos átmenettel

## 4 Jelzőhang szűrő és detektor

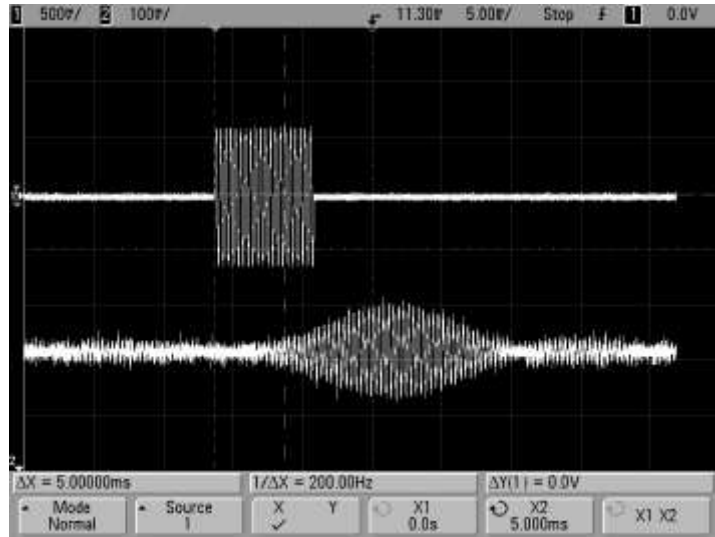
Jelzőhangok, jelek DSP alapú detektálása több lépésben valósítható meg. A detektálást a fogadott jel digitális mintákból végezzük. Első lépésben DSP alapú sáv-áteresztő szűrőn vezetjük át a mintákat, és csúszó ablakos technikával (vagyis egy paramétrezhető időablakban) az áteresztő sávban megjelenő jel energiát számolunk. Ugyanekkor a szüretlen jel energiáját is számítjuk. Az energiaszámításnál alkalmazott algoritmusban a csúszó ablakba eső minták négyzetét összegezzük. A kalkulált szumma arányos a jel energiával.

A következő ábra az algoritmus tesztelése során használt LWDF [4] sáváteresztő szűrő átviteli függvényét mutatja, ami 1100Hz jelzőhang felismerését teszi lehetővé.



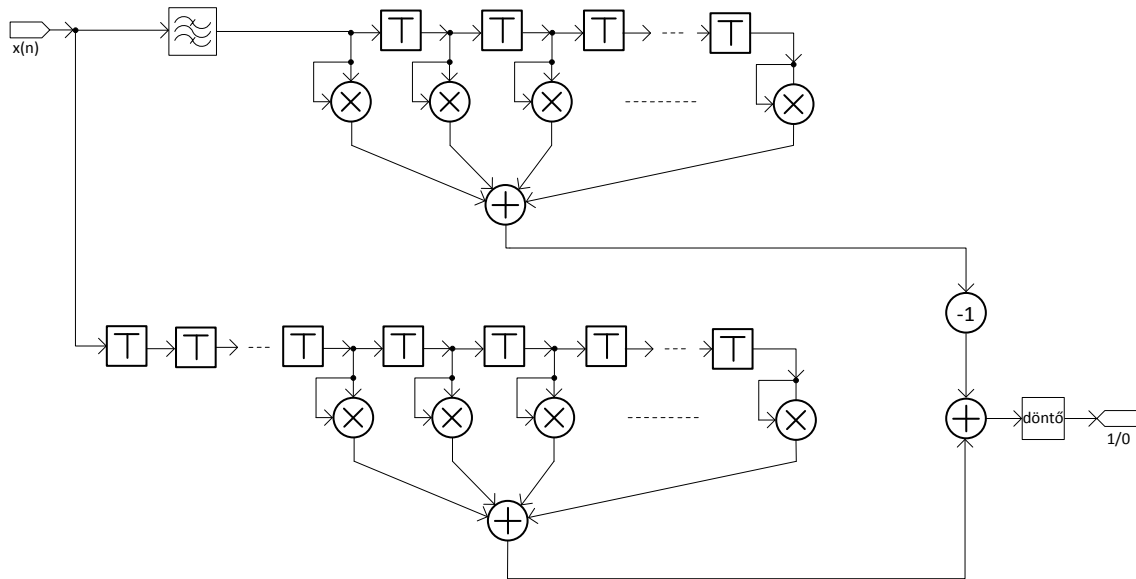
2. ábra  
Sáváteresztő LWDF átvitele és annak duális párja

A következő lépésben a két jel energia összehasonlításával döntjük el, hogy a csatornában a mérőjel jelen van-e vagy sem. A sáváteresztő szűrő természetéből adódóan futásidővel rendelkezik, ami az átengedett jelre nézve késleltetést jelent. Erre vonatkozó mérési eredményt a következő ábrán láthatjuk.



3. ábra  
Sáváteresztő LWDF jelátviteli késleltetése

A fenti mérésnél a szűrő áteresztő sáv, sávközépi frekvenciájának megfelelő harmonikus vizsgáló jelet kapcsoltuk, körülbelül 8ms időtartamú burst formájában. Jól megfigyelhető, a kimenő jel késleltetése. A mérési eredményünket terheli, vagyis a késleltetéshez hozzáadódik a mérést lehetővé tevő A/D és D/A környezet, melyben a legjelentősebb késleltetést a helyreállító analóg szűrő futási ideje okozza, ami jelen esetben körülbelül 2 ms.



4. ábra  
Jelfelismerő algoritmus

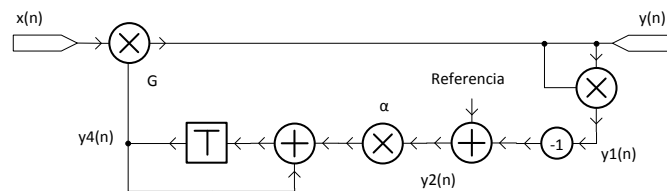
A jeldetekciós algoritmusban a digitális sáváteresztő szűrő okozta futási idő problémát úgy tudjuk kiküszöbölni, hogy a csúszóablakos jelenergia számításnál a szüretlen minták és a szürt minták között a szűrő futási idejének megfelelő időbeli offsetet alkalmazunk, vagyis a szüretlen mintákra késleltetést valósítunk meg. Abban az esetben, ha a késleltetés offsetet nem alkalmazunk az átmeneti detekciós bizonytalanság forrás lehet. A bizonytalanság csökkenthető a csúszó ablak méretének növelésével, de a nem kikompenzált futási idő negatív hatással lesz az érzékelés dinamika tartományára.

## 5 Digitális demodulátor

A digitális demoduláció során a cél az, hogy a vett szimbólum sorozatból reprodukáljuk a logikai '1' és '0'-ból álló jelfolyamot. A feladat megoldása több lépésből áll, a megvalósításnál most is a hatékony, processzor idővel gazdaságosan bányó megoldást vizsgáljuk. A vizsgálatokhoz FSK-t használunk.

Első ránézésre gondolhatnánk, hogy a jelzhang detekcióhoz hasonló módon kialakíthatjuk az egyes szimbólumok felismerését, mint azt a jelzhangok felismerésénél már megtettük. Ez az algoritmus, már kis szimbólum sebességek esetén is működésképtelennek mutatkozik, hiszen 600Bd szimbólum sebesség esetén a szimbólumidő mindössze 1,6ms ami egy magas fokszámú sáváteresztő szűrő tranziens idejével és csoportfutási idejével összemérhető.

Hatékony DSP alapon működő demodulátor több funkcióra bontható. Az első feladat az, hogy a jelszintet egy jól feldolgozható jelszintre erősítsük, vagy csillapítsuk. Erre a feladatra egy digitális AGC fokozatot kell kialakítanunk [5].

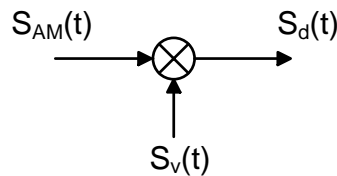


5. ábra

AGC algoritmus egyszerűsített jelfolyam diagramja

Tisztán, szögmoduláció esetén (FSK vagy PSK), viszonylag egyszerű a dolgunk, de az olyan esetekben, ahol a vivő amplitúdó változása is hordoz információt, nagy körültekintéssel kell végezzük a jelszinttel kapcsolatos módosítást.

A következő lépésben a bejövő szimbólum sorozat felismerését lehetővé tevő demodulációs fázis. FSK jel esetén az analóg amplitúdó demodulálás módszerét alkalmaztuk.

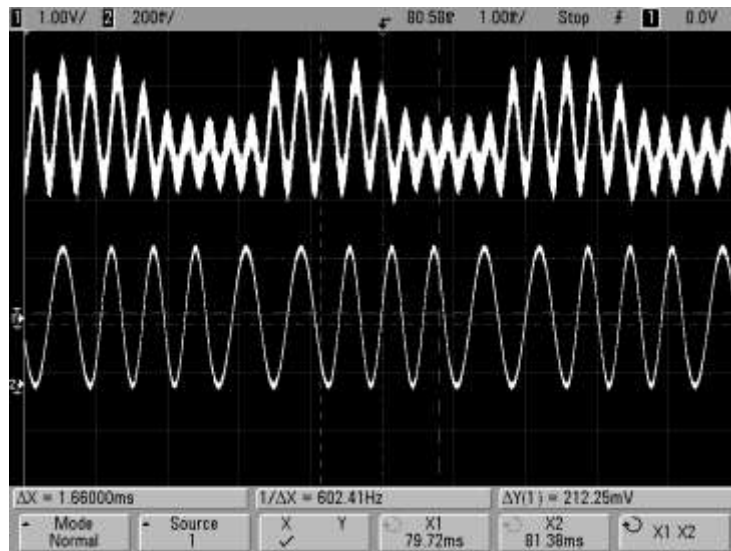


6. ábra

Analóg AM szorzódemodulálás elve

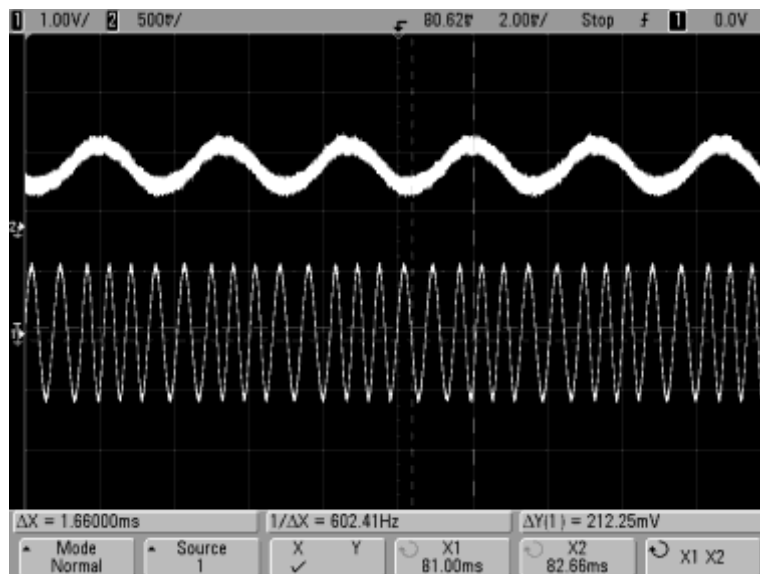
$$\begin{aligned}
 S_d(t) &= S_{AM}(t) \cdot \cos(\omega_v t + \varphi) = a(t) \cos(\omega_v t) \cdot \cos(\omega_v t + \varphi) = \\
 &= \frac{a(t)}{2} \cdot \cos \varphi + \frac{a(t)}{2} \cdot \cos(2\omega_v t + \varphi)
 \end{aligned}$$

Demodulátorként szorzó áramkört alkalmazunk, ahol az FSK jelet az FSK jel két ütemnyi késleltetettjével összeszorozzuk. A példában szereplő FSK jel szimbólum készlete kettő elem, melyhez két különböző frekvenciaérték tartozik. A két különböző frekvenciájú szimbólum esetén a két ütemnyi késleltetés különböző fázistolást eredményez, így a szorzás eredménye különböző amplitúdójú jelet jelent a két szimbólum esetén. Ezt megfigyelhetjük a következő mérési eredmény esetében, ahol a vizsgáló jel váltakozóan '1' és '0' értéket szállít.



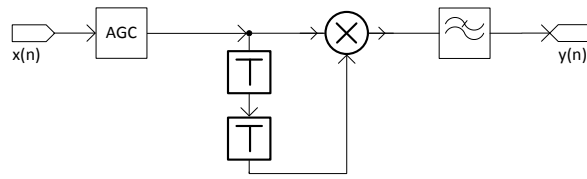
7. ábra  
FSK jel és a demodulátor kimenet

A fenti ábrán látható demodulált jelben jól látható az amplitúdó különbség, döntés akár a jelenergia számítással is megvalósítható lenne, de ehhez mindenképp pontos szinkronizálás lenne szükséges, vagyis pontosan detektálnunk kellene a szimbólum határokat. Mivel a DSP algoritmusunk jelen fázisban nem alkalmas a szinkronizálásra, ezért egy másik megoldást választottunk, kiszűrtük a felesleges harmonikus összetevőket a demodulált jelből. A szűrést aluláteresztő, skálázott LWDF-el valósítottuk meg.



8. ábra  
FSK jel és a demodulált jel a szűrést követően

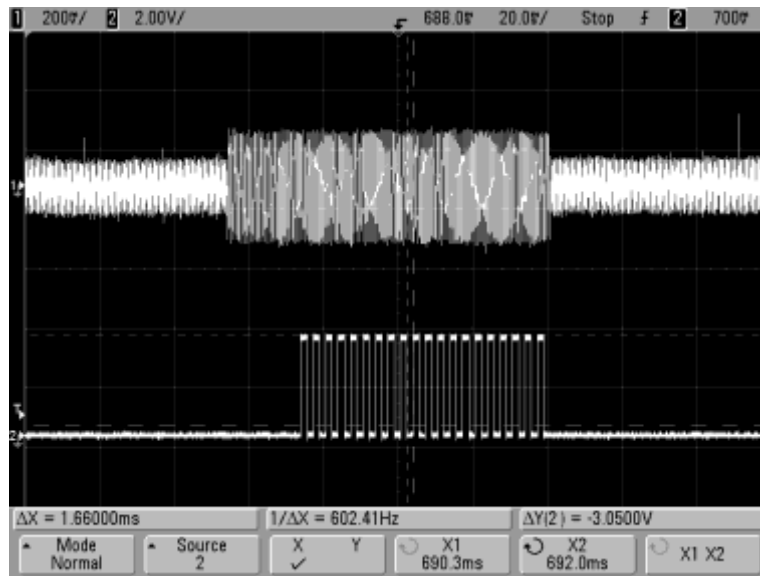
A sűrést követően egy könnyebb kezelhetőségű mintasor áll elő a rendszerben, melyet a fenti ábrán láthatunk, amit a DSP demodulátor algoritmus kimenetének tekintünk. A demodulálást végző DSP algoritmust a következő ábrán adtuk meg.



9. ábra  
FSK demodulátor DSP megvalósítása

A demodulátor kimeneti jel segítségével a szinkronizálás is jól megoldható. A szinkronizálás módszere nagymértékben függ az üzenetsomag felépítésétől, vagyis az adott rendszerben alkalmazott keret struktúrától.

A szinkronizálás folyamatát egy olyan üzeneten szemléltetjük, mely üzenet egy felvezető szinkronizáló szekvenciával kezdődik, melyet egy '1101' SOF<sup>4</sup> kombináció zár. A SOF szekvenciát követően már azok a szimbólumok érkeznének, melyek hasznos, vagyis ténylegesen demodulálendő üzenetet szállítanak. Az SOF szekvencia utolsó bitjének szimbólum közepét már nagy pontossággal meg kell határozzuk, hiszen a hibás szinkronizálás szimbólumok közti áthallás<sup>5</sup> eredményezhet

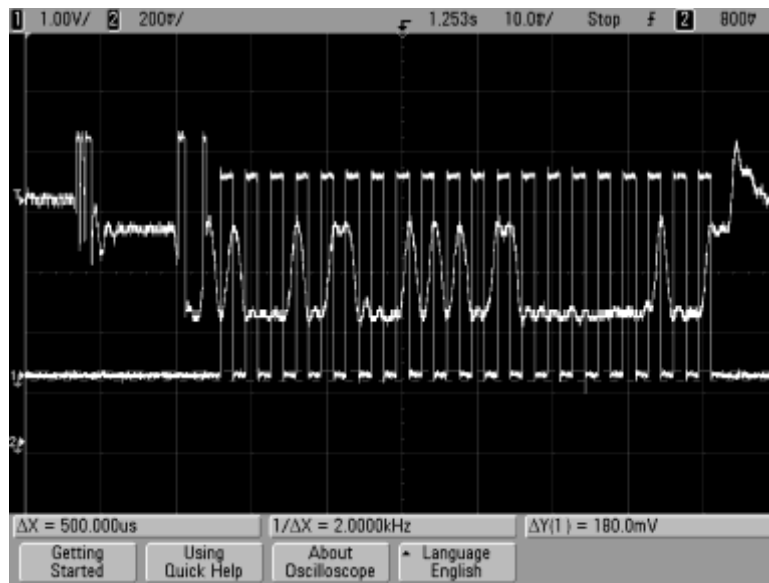


10. ábra  
FSK üzenet burst és az abból kinyert órajel

A szinkronizálás szemléltetésére a jelfeldolgozó processzor egy általános IO lábát a szinkronizált órajel ütemében változtattuk, így ellenőrizni tudtuk a szinkron algoritmus helyességét. A szemléltetés kedvéért a felépített DSP algoritmusra egy valódi üzenetet is rákapcsoltunk és rávetítettük az üzenet demodulált és szűrt jelére a kinyert órajelet. A következő ábrán a döntési pontokat az órajel le- és felfutó élei jelzik.

<sup>4</sup> Start Of Frame

<sup>5</sup> Szimbólumok közti áthallás = ISI – Inter Symbol Interference



11. ábra  
Demodulált üzenet és az órajel viszonya

A demodulátor kimeneten megjelenő “jelszint”, valójában minta sorozat azon mintáit kell értelmezni, melyek a szimbólum középénél keletkeztek. Helyes órajel szinkron esetén elegendő a szinkron pillanatban lévő minta értelmezése, hiszen a demodulátor kimenet aluláteresztő szűrő tagja nem teszi lehetővé, hogy ugrás legyen a minták között. Ennek ellenére, ha biztosabb döntést kívánunk hozni, akkor a szinkron pillanatban értelmezett minta és annak szomszédos mintáinak figyelembevételével hozhatunk többségi döntés elven született döntést is.

## Összegzés

Cikkünkben több, a telekommunikációban használható algoritmust mutattunk be, melyek nagy hatékonyságúak, stabilak és jól skálázhatók. Az algoritmusok kis számítási kapacitású, fix pontos számábrázolást alkalmazó digitális jelfeldolgozó processzorral is megvalósíthatók. Az algoritmusokat dsPIC33E sorozatú DSC-n teszteltük. A példák a telekommunikációban gyakran alkalmazott, 8000Hz-es mintavételi frekvencián működtek, de természetesen más feltételek mellett is helytállnak. Az algoritmusok tervezéséhez mind a direkt struktúrájú, mind pedig a hullámdigitális eljárásokat vegyesen alkalmaztuk.

## Hivatkozások

- [1] UIC-kódex 751-3 4. kiadás 2005. január; Nemzetközi szolgálatban álló analóg vonatrádió-rendszerekre vonatkozó műszaki előírások.
- [2] dsPIC33E Family Data Sheet (DS70616G), [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
- [3] Wühl – Gyányi: DSP alapú mobil hálózati teszter, XXIX. Kandó Konferencia • 29th Kandó Conference November 21, 2013, Budapest, Hungary
- [4] Lajos Gazsi: Explicit Formulas for Lattice Wave Digital Filters, IEEE vol.cas-32, No1, January 1985.
- [5] Wühl: DSP algoritmusok, OE-KVK-2116 Budapest, 2014.