

**IMPULZUSKOMPRESSZIÓ
ALKALMAZÁSA AZ UWB IR
RENDSZEREK BEN A LEFEDETT SÉG
NÖVELÉSÉRE**

Krébesz Tamás István

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék,
Budapest, Magyarország

IMPULZUSKOMPRESSZIÓ ALKALMAZÁSA AZ UWB IR RENDSZEREK BEN A LEFEDETT SÉG NÖVELÉS ÉRE

Absztrakt

A vezeték nélküli adatátviteli rendszerek lefedettségét két paraméter korlátozza: (i) az adó oldalon kisugárzott bitenergia és (ii) a vevő teljesítőképessége a bithiba-arány (BER) tekintetében. Az ultra-szélessávú (UWB) impulzus rádió (IR) esetében az adó oldalon kisugárzott bitenergiát közvetetten az USA-ban működő Szövetségi Hírközlő Hatóság (FCC) szabályozása korlátozza, amíg a bithiba-arány a vevőben alkalmazott detekciós algoritmustól függ. Az UWB IR eszközök valós körülmények közötti alkalmazhatóságát az általuk biztosított elfogadhatatlanul alacsony lefedettség akadályozza.

Az impulzuskompresszió alkalmazása kerül bemutatásra jelen munkában az alacsony lefedettség problémájának kezelésére, amely egyidejűleg teszi lehetővé a kisugárzott bitenergia megnövelését az adóban, és bithiba-arány javulást eredményez a vevőben. Az impulzuskompresszió eredményeképpen az új, UWB chirp IR eszközök a hagyományos UWB IR eszközökhöz képest hatszoros hatótávolsággal rendelkeznek.

Kulcsszavak: impulzuskompresszió, UWB rádió, chirp impulzus, lefedettség, csatornamodell

Bevezetés

A megvalósított UWB-impulzus rádió eszközök esetében a vezeték nélküli lefedettséget az egy bitnyi információ kisugárzásához felhasználható energia korlátozza. Az UWB-impulzus időtartama jellemzően néhány nanoszekundumra van állítva annak érdekében, hogy a vivő ultra-szélessávú legyen. Sajnos ez a rendkívül rövid idejű UWB-impulzus nagyon alacsony energiát képes hordozni bitenként, amely túlságosan kis hatótávolságot, néhány méteres lefedettséget eredményez (IST Programme (FP6) 2005, IST Programme (FP7) 2008-2011, Kolumbán et al. 2010). Ez az alacsony lefedettség megakadályozza az UWB IR eszközök praktikus felhasználását.

A bitenergia két módon növelhető: vagy az impulzus teljesítményét, vagy annak időtartamát kell növelni.

Az FCC Szabályozás korlátozza az UWB-eszközök által kisugározható teljesítmény csúcs és átlag értékét (FCC 2009), aminek következtében az impulzus teljesítménye nem növelhető tetszőlegesen. Korlátozást jelent továbbá az UWB-eszközben megengedett feszültségszintekre az a tény, hogy az UWB-eszközök jellemzően CMOS technológiával gyártott mobil eszközök, amelyekben AAA típusú elemek biztosítják a tápellátást. Ennek következtében az adó kimenetén a csúcshőfeszültség értéke nem haladhatja meg a 0,5 V-ot.

Egy módja a kisugárzott bitenergia, és így a lefedettség növelésének az, ha hosszabb időtartamú UWB-impulzust sugárunk ki. Olyan megoldás szükséges, amely megőrzi az ultra-szélessávú tulajdonságát az impulzusnak - amely legalább 500 MHz-es RF sávzélességet jelent - a megnövelt időtartama ellenére. A fenti kritérium teljesítésére a chirp impulzus nagyszerű jelölt, hiszen kombinálja az ultra-szélessávúságot és a hosszú impulzus időt. Jelen munka 100 ns időtartamú FM modulált UWB chirp impulzusok alkalmazását javasolja a vezeték nélküli UWB adatátviteli rendszerben vivőként.

A valós UWB alkalmazásokban a csatorna diszperzív, aminek következtében a hosszú időtartamú UWB chirp impulzusok átlapolódnak. Ennek eredményeképpen a különböző jelutakon terjedő impulzusok szeparáltsága a vevőben nem garantálható. A chirp impulzusok és vevő oldali illesztett szűrő alkalmazásával impulzuskompresszió valósítható meg, amely a többutas diszperzív csatorna okozta átlapolódó impulzusok szeparálhatósági problémáját megoldja.

Az impulzuskompresszió két fontos tulajdonságát érdemes kiemelni: (i) az adóban generált FM modulált chirp jel konstans burkolójú, amely nagy hatásfokkal rendelkező nemlineáris teljesítményerősítővel erősíthető, és (ii) az impulzuskompresszió egy feldolgozási nyereséget eredményez a vevő oldalon, amely javítja annak bithiba-arányát.

Figyelembe véve az adó oldalon megnövelt E_b bitenergiát és a vevő oldali bithiba-arány javulást, az UWB IR eszközök lefedettsége 6 szorosára növelhető, vagyis a hatótávolság a 10 méter alatti értékről mintegy 40 méterre nő.

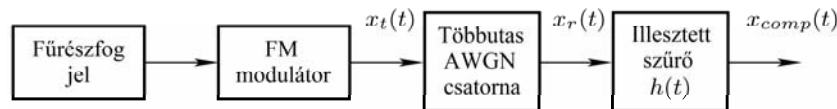
Jelen munka megvizsgálja az impulzuskompresszió tulajdonságait, megadja a kompresszió alapú UWB chirp IR rendszer tervezési egyenleteit, és szimulációk útján bemutatja annak viselkedését zajos többutas diszperzív csatornában. Az alkalmazott csatornamodell az IEEE 802.15.4a csatornamodellekért felelős albizottsága által publikált, nemzetközileg elfogadott és használt csatorna modell.

Impulzuskompresszió alkalmazása UWB IR vevőkben

Az impulzuskompresszió alapötlete a radar technológiából ered, ahol a fő cél az, hogy az impulzus csúcsteljesítményét időbeli kompresszió által növeljék. Az impulzuskompresszió alkalmazásával a hosszú időtartamú impulzus által hordozott nagy energia kombinálható az extrém rövid időtartamú impulzus szélessávú tulajdonságával.

Az impulzuskompresszió alapötlete

Az UWB chirp IR esetében alkalmazott impulzuskompressziós megoldás blokk diagramja az 1. ábrán látható. Az adó oldalon az információt hordozó jelen frekvencia modulációt (FM) hajtunk végre, így áll elő a többutas, additív fehér gaussi zajjal (AWGN) terhelt csatornába kisugárzott UWB chirp vivő, amelyet $x_t(t)$ jelöl. A vett jel, $x_r(t)$, egy illesztett szűrőre kerül, amelyet $h(t)$ impulzusválasza jellemez. A komprimált impulzust, amelyet $x_{comp}(t)$ jelöl, az illesztett szűrő kimenetén mérjük (Skonik 2008).



1. ábra Jelfeldolgozás az impulzuskompresszió alkalmazásakor.

A lineáris chirp esetében, amelyet jelen megoldásban alkalmazunk, a vivő pillanatnyi frekvenciája lineárisan változik az impulzus ideje alatt, amely függvény

$$f(t) = f_0 + \mu t \quad (1)$$

alakban írható, ahol f_0 a kezdőfrekvenciát, μ pedig a frekvenciaváltozás sebességét jelenti. A kapcsolatot a generált jel $2B$ RF sávszélessége és az UWB chirp impulzus T_c ideje között a μ paraméter teremti meg:

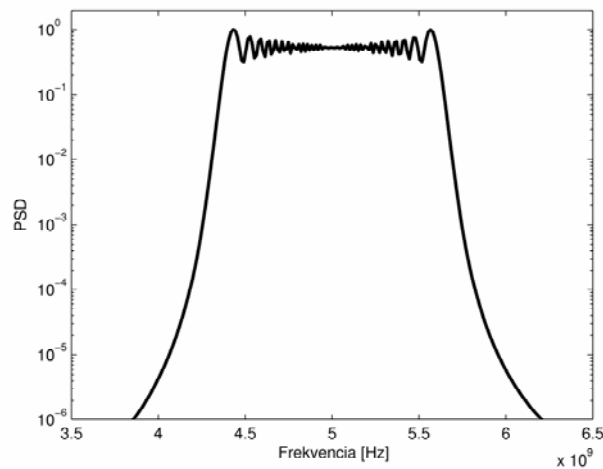
$$\mu = \frac{2B}{T_c}. \quad (2)$$

Az illesztett szűrő impulzusválaszára a kisugárzott chirp jel paramétereiből levezetve a következő összefüggést kapjuk:

$$h(t) = \exp \left\{ j2\pi \left[f_0(T_c - t) + \frac{\mu}{2}(T_c - t)^2 \right] \right\}. \quad (3)$$

Hullámformák az UWB chirp IR rendszerben

Tekintsünk egy UWB chirp IR rendszert, amelyben $2B = 1333,12$ MHz. Legyen $T_c = 100$ ns értékű, hogy elegendően nagy bitenergiát kapjunk a hagyományos UWB rendszerekhez képest, ahol $T_c \approx (2B)^{-1} \approx 0,75$ ns. A 2. ábra a kisugárzott UWB chirp jel (lásd 1. ábra $x_i(t)$ jele) teljesítmény spektrumát mutatja.



2. ábra Az UWB chirp impulzus spektruma.

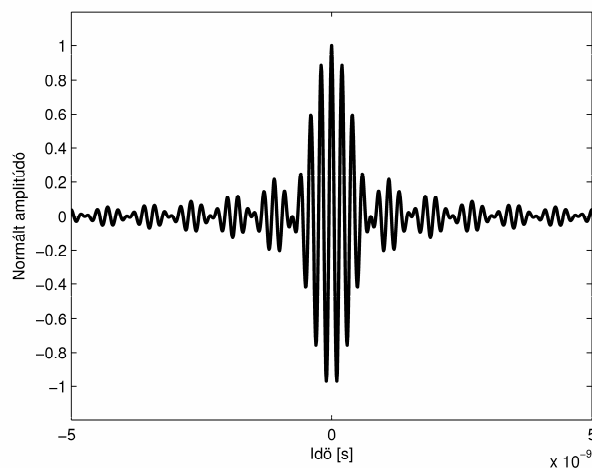
Az impulzuskompressziót végző illesztett szűrő $x_{comp}(t)$ kimenetének időfüggvénye a 3. ábrán látható. Az eredetileg 100 ns idejű chirp néhány ns idejű lett.

Impulzuskompresszió zajos IEEE 802.15.4a szerinti többutas csatornában

Az IEEE 802.15.4a csatorna modellekért felelős albizottsága számos csatorna modelljét dolgozta ki, hogy a különböző terjedési környezetekben mutatott viselkedése az UWB rendszereknek szimuláció útján kiértékelhetővé és összehasonlíthatóvá váljon. Matlab kód került kidolgozásra 9 különböző terjedési környezetre (Molisch 2004). Ezeknek a csatornamodelleknek (CM) a használata kötelező.

Azért, hogy demonstráljuk az impulzuskompresszió hatékonyságát, bemutatásra kerül a vett zajos jel a kompresszió előtt és után. A könnyű vizuális kiértékelhetőség végett a „hó borította nyílt térben történő terjedési környezet”,

vagyis a CM9 került kiválasztásra, ahol kicsi a többutas terjedésből származó jelutak száma. A kifejlesztett Matlab programunk egyik terjedési realizációja alapján, amely alábbiakban kerül kiértékelésre, látható, hogy 4 terjedési jelút van.



3. ábra Komprimált UWB chirp impulzus az illesztett szűrő kimenetén.

A 4. ábra mutatja az $x_r(t)$ vett jelet az időtartományban impulzuskompresszió előtt. A többutas terjedés mellett a vett jel additív gaussi fehér zajjal (AWGN) is torzított. A jel-zaj viszony (SNR) értéke -3 dB. A csatorna körülmények olyan rosszak, hogy hasznos jel nem ismerhető fel a vett jelben.

Az impulzuskompresszió fontos előnye, hogy az illesztett szűrő kimenetén javítja az SNR értékét. Ez a feldolgozási nyereség arányos a kompresszió előtti és utáni hasznos jel időtartamának hányadosával, vagyis

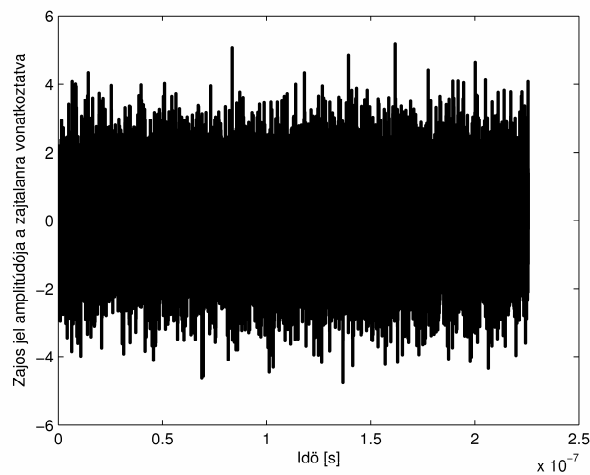
$$R = 2 \frac{T_c}{T_{comp}} \quad (4)$$

ahol T_{comp} jelöli a komprimált chirp impulzus idejét.

Az impulzuskompressziót végző illesztett szűrő $x_{comp}(t)$ kimenetét mutatja az 5. ábra. Az illesztett szűrő időben komprimálja az UWB chirp jelet és feldolgozási nyereségének köszönhetően jelentősen javítja az SNR értékét. Megfigyelhető, hogy a 4. ábrán a vett zajos jelben felismerhetetlen impulzusok egyértelműen megkülönböztethetővé váltak az 5. ábrán.

Az UWB rádió lefedettségének javítása

A vezeték nélküli eszközök hatótávolságát két paraméter határozza meg: (i) a kisugárzott bitenergia, E_b , és (ii) a vevő által biztosított BER. Az E_b értékét az FCC szabályozás korlátozza, amíg a BER értéke a terjedési csatorna tulajdonságaitól és a vevőben alkalmazott detektálási algoritmustól függ. Jelen fejezetben ezen paraméterek vizsgálata történik.



4. ábra Vett $x_r(t)$ jel zajos, IEEE CM9-es csatornában, 4 terjedési út esetén, komprimálás előtt.

A bitenergia növelése

Leggyakrabban gaussi impulzusokat használnak a hagyományos UWB IR rendszerekben (Siwiak 2004). Az időtartama egy gaussi vivő impulzusnak akár 0,75 ns értékű is lehet. Ez a rendkívül rövid időtartamú impulzus kerül összehasonlításra az UWB chirp rendszerben alkalmazott hosszabb, akár több 100 ns-os impulzussal.

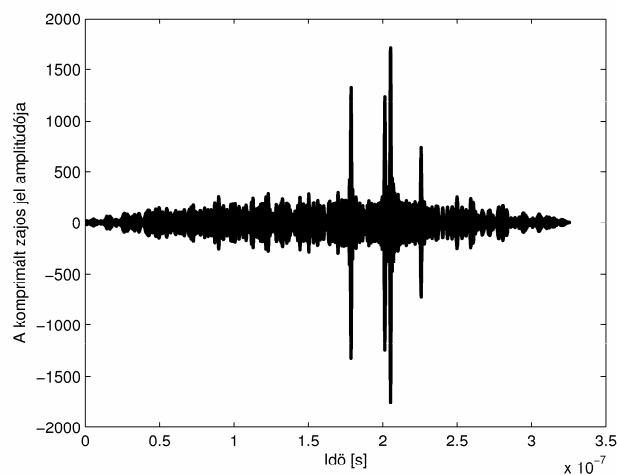
A szélessávú UWB IR rendszerben, amelyet vizsgálunk a sávszélesség $2B=1333,2$ MHz. A kisugárzott chirp impulzus paraméterei az FCC előírás és a limitált tápfeszültség figyelembe vételével kerültek megválasztásra. A referencia UWB IR rendszer gaussi impulzust használ vivőként. Az elérhető legnagyobb feszültség amplitúdó, amely az adó kimenetén a 0,5 V-ot nem lépheti túl meghatározza a legnagyobb kisugározható E_b értéket (Kolumbán et al. 2010). Az UWB chirp IR rendszerben az adó kimenetén az

FCC szabályozás korlátoz, ami alapján megengedett legnagyobb feszültség szint 0,22 V.

A megnövelt bitidőnek köszönhető E_b növekedés az UWB chirp IR rendszerben 15,3 dB.

A vevő bithiba-arányának javítása

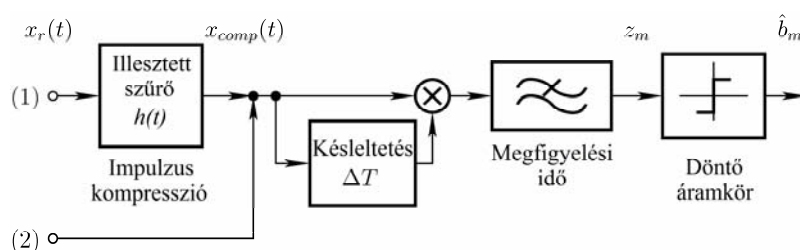
Széleskörűen elfogadott tény, hogy az UWB alapú adatátvitelben csak nemkoherens detektorok valósíthatók meg (Witrisal et al. 2009).



5. ábra Komprimált UWB chirp jel, $x_{comp}(t)$ zajos IEEE CM9-es csatornában 4 terjedési út esetén.

Az átvitt referenciájú (TR) modulációt alkalmazó adó jele demodulálható autokorrelátoros vevővel, amely rendkívül robusztus nemkoherens vevő konfiguráció. Egy TR jelben minden kiküldött b_m bit kettő UWB-impulzusra van leképezve, ahol az első impulzus a referencia, míg a második az információt hordozó impulzus. Ha 1-es bit kerül kiküldésre, akkor a második impulzus a referencia impulzus késleltetett verziója. Ha 0-ás bit kerül kiküldésre akkor a második impulzus az első késleltetett és invertált verziója. Az autokorrelátoros vevő meghatározza a referencia és információt hordozó impulzusok közötti korrelációt és a korreláció előjelét használja fel a bináris döntés meghozatalára. A referencia és információt hordozó hullámformák között a késleltetésnek elég nagynek kell lennie ahhoz, hogy elkerüljük a többutas csatorna okozta szimbólum-közi áthallást. Az UWB chirp IR autokorrelátoros vevő blokkdiagramja a 6. ábrán látható. A vett UWB chirp jel,

$x_r(t)$ az (1)-es bemenetre jut, amelyet az illesztett szűrő feldolgoz, és előállítja $x_{comp}(t)$ jelet, ami a korrelátorra kerül. A megfigyelési időt az aluláteresztő szűrő sávszélessége határozza meg. A megfigyelési jel, z_m a döntő áramkör bemenetére kerül, amely egy komparátor, és a kimenete adja a visszaállított \hat{b}_m bitet.



6. ábra Impulzuskompressziót alkalmazó autokorrelátoros vevő blokk diagramja.

Egy referencia UWB IR rendszer is meg lett alkotva, hogy az UWB impulzuskompresszió hatékonysága kiértékelhető legyen. A referencia rendszer gaussi impulzusokat használ vivőként (Siwiak 2004) és TR modulációt alkalmaz. A helyes összehasonlítás végett a 6. ábra vevőstruktúráját használjuk, amely alapján a vett gaussi UWB IR jelet a (2)-es bementi ponton vezetjük a vevőbe.

Felhasználva a 6. ábrán bemutatott vevő modellt és a Matlab UWB IEEE 802.15.4a csatorna modelleket, számos szimulációt végeztünk, hogy összehasonlítsuk az itt ismertetett UWB chirp IR és az irodalomból jól ismert gaussi vivőjű UWB IR rendszerek bithiba-arányát.

A szimulációk eredményei a 7. ábrán láthatóak. A folytonos vonal mutatja a referencia UWB IR rendszer bithiba-arányát TR moduláció esetén (Kolumbán et al. 2010). A '+' jelek jelölik a szimulációk eredményét, amelyek szorosan illeszkednek az elméleti BER görbére, amikor nem alkalmazunk impulzuskompressziót. Ekkor a referencia és a chirp UWB rendszer azonos BER görbéjű. A szaggatott vonal mutatja azt a szimulációkon alapuló BER görbét, amikor impulzuskompressziót alkalmazunk egy CM9-es csatorna esetén UWB chirp IR rendszerben.

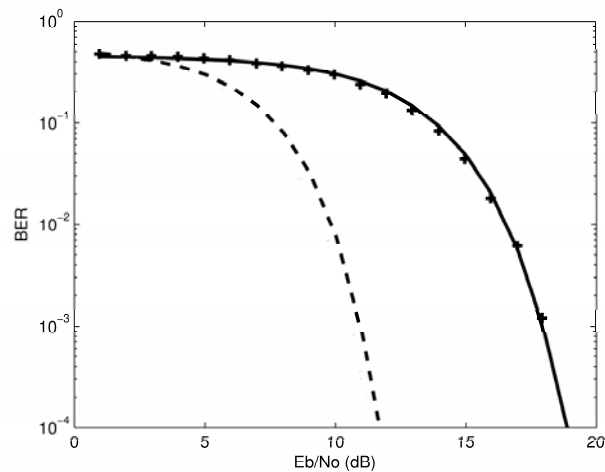
A nemkoherens vezeték nélküli adatátviteli rendszerekben a $BER=10^{-3}$ bithiba-arány a vevők összehasonlításához egy reális paraméter érték. A szimulációk eredménye alapján látható, hogy átlagosan 7,8 dB javulás volt elérhető az impulzuskompressziónak köszönhetően.

A vezeték nélküli lefedettség növelése

Az IEEE csatorna modellekért felelős albizottsága a Matlab szimulációs csatorna modellek mellett kidolgozott egy matematikai modellt az UWB csatornákra. A távolságfüggő csatorna csillapítását a következő formában adták meg (Molisch 2004):

$$PL(d) = PL_0 + 10n \log_{10}(d / d_0) \quad (5)$$

ahol a referencia távolság, d_0 értéke 1 m, PL_0 a csatorna csillapítása a d_0 távolságban decibelben, d jelenti az adó és vevő antenna távolságát méterben, n pedig a csillapítási exponens, amely a terjedési környezettől függ, értéke 1,2 és 4,58 között változik.

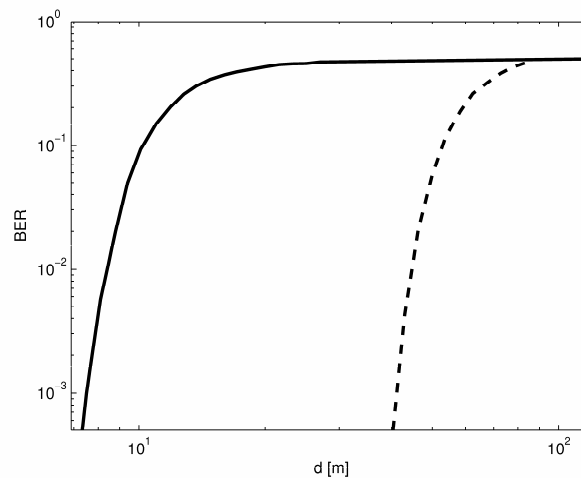


7. ábra A referencia UWB IR rendszer (folytonos vonal) és az impulzuskompressziót alkalmazó UWB chirp IR rendszer (szaggatott vonal) BER görbéje.

Feltételezzünk egy beltéri irodai terjedést, amikor az adó és vevő között nincsen közvetlen jelút (NLOS). Ekkor $PL_0 = 57,9$ dB, és $n = 3,07$. Emlékeztetőül, 15,3 dB nyereséget értünk el E_b értékében a megnövelt időtartamú chirp jelnek köszönhetően, és 7,8 dB BER javulást jelentett a vevő oldalon az impulzuskompresszió alkalmazása. Behelyettesítve ezeket az eredményeket az (5)-ös összefüggésbe, kiadódik, hogy az UWB chirp IR rendszer hatótávolsága a hagyományos UWB IR rendszerének a 6 szorosa,

vagyis a lefedettség a kevesebb mint 10 méterről 40 méterre nőtt $BER=10^{-3}$ esetén, ahogy az a 8. ábrán látható.

A hatótávolság növekedése függ a kisugárzott impulzus időtartamától, amely minél nagyobb, annál nagyobb a lefedettség. Azonban a megnövelt impulzus időtartam növeli az impulzus interferenciák valószínűségét és csökkenti a maximálisan elérhető adatátviteli sebességet.



8. ábra A referencia UWB rendszer (folytonos vonal) és az UWB chirp IR rendszer (szaggatott vonal) bithiba-aránya az adó és vevő antenna távolságának függvényében beltéri irodai NLOS terjedési környezetben.

Összefoglalás

Egy új UWB IR adatátviteli megoldás, nevezetesen, az UWB chirp IR és az impulzuskompresszió alkalmazása került ismertetésre az UWB IR rendszerek hatótávolságának megnövelése érdekében. A kisugárzott UWB chirp impulzus időtartama jelentősen növelhető és az így megnőtt E_b nagyobb lefedettséget biztosít. Az E_b általi nyereség 15,3 dB amikor a chirp impulzus időtartamát 100 ns-ra növeljük, a gaussi impulzus jellemző 0,75 ns értékéről. A megnövelt E_b ellenére az FCC előírásokat nem sértjük meg.

Az impulzuskompresszió egy feldolgozási nyereséget hoz be a vevő oldalon, amely javítja a BER-t. A szimulációk alapján ennek a javulásnak az értéke 7,8 dB a hagyományos UWB IR rendszerekhez képest.

A többutas csatornában az UWB-impulzusok átlapolódhatnak. A komprimálás után az átlapolódott impulzusok szeparálódnak.

Az UWB chirp IR rendszer megnövelt bitenergiája és a vevő javított BER értékének köszönhetően a hatótávolság kevesebb, mint 10 méterről 40 méterre nőtt.

Hivatkozások

IST Programme (FP6) of the 6th EU Framework Programme. 2005. *Pervasive Ultrawideband Low Spectral Energy Radio Systems (PULSERS)*, Online: <<http://www.pulsers.eu/pulsers/index.php?home>>.

IST Programme (FP7) of the 7th EU Framework Programme. 2008-2011. *Coexisting Short Range Radio by Advanced Ultra-Wideband Radio Technology (EUWB)*, Online: <<http://www.euwb.eu/>>.

Kolumbán, Géza, F. C. M. Lau, és C. K. Tse. 2010. *UWB radio: From an idea to Implementations*. IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Nanjing, Kína. ICUWB'10 Konferencia kiadvány-Tutorial Session.

FCC (Federal Communications Commission). 2009. *Part 15 of the Commission Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems; Subpart F*, FCC–USA, Online: <<http://sujan.hallikainen.org/FCC/FccRules/2009/15/>>.

Skonik, M. I. 2008. *Radar Handbook*, 3rd ed. McGraw Hill.

Witrisal, K et al. 2009. *Noncoherent Ultra-Wideband Systems: An Overview of Recent Research Activities*. IEEE Signal Processing Magazine. vol. 26, no. 4, pp. 48–66.

Molisch, A. F. et al. 2004. *IEEE 802.15.4a Channel Model – Final Report*, IEEE802.15.4a Channel Modeling Subgroup, Online: <<http://www.ieee802.org/15/pub/04/>>.

Siwiak, K. és D. McKeown. 2004. *Ultra-Wideband Radio Technology*. Chichester, UK: Wiley.