

# IEEE 802.15.4a Standardında Sistemlerin Birlikte Varolabilmeleri için Darbelerin Doğrusal Birleşimi

## Linear Combination of Pulses for Coexistence in the IEEE 802.15.4a Standard

Serhat Erküçük ve Burç Arslan Kaleli

Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Kadir Has Üniversitesi, Cibali, İstanbul, 34083  
{serkucuk, burc.kaleli}@khas.edu.tr

### Özetçe

Aşırı geniş bantlı (ultra-wideband – UWB) dürtü radyolarını kullanan düşük hızlı, doğru yer ve uzaklık bulabilen Kablosuz Kişisel Alan Ağları (Wireless Personal Area Network – WPAN) standardı IEEE 802.15.4a’da birincil sistemlere olan girişimi azaltmak için darbelerin doğrusal birleşimi kullanılması tavsiye edilir. Bu bildiri de standarttaki tavsiyeler doğrultusunda darbelerin doğrusal birleşiminin olası gerçekleştirmeleri dikkate alınarak ortaya çıkan kod spektrumundaki ani düşüşler incelenmektedir. Z-dönüşümü kullanılarak yapılan bu çalışmada, spektrumdaki ani düşüşlerin sayısının sınırlı ve oluşma yerlerinin esnek olmasının standartta izin verilen darbe sayısının sınırlı sayıda olması nedeniyle olduğu gösterilmektedir. Ayrıca, istenilen sayıda ve frekanslarda ani düşüş elde edebilmek için bazı önerilerde bulunulmaktadır.

### Abstract

The low data rate, accurate location-ranging Wireless Personal Area Network (WPAN) standard IEEE 802.15.4a, which is based on ultra-wideband (UWB) impulse radios, suggests using linear combination of pulses to reduce interference to coexisting primary systems. In this paper, we consider possible implementations of linear combination of pulses as suggested in the standard, and study the generated notches in the resulting code spectrum. Using the z-transform approach, we show that the number of these notches is limited and the notch locations are not flexible due to the limited number of pulses allowed by the standard. We also make some suggestions for increasing the number of notches at desired frequencies.

### 1. Giriş

Aşırı geniş bantlı (ultra-wideband – UWB) sistemler mevcut lisanslı haberleşme sistemleri ile aynı spektrumu paylaşmak üzere düşük güç spektrum yoğunluğu olan sistemler olarak tasarlanmışlardır. Bu sistemlerin düşük iletim gücüne rağmen, Avrupa ve Japonya’daki spektrum düzenleme kurulları mevcut sistemlere olan girişimleri engellemek için algıla-ve-kaçın (Detect-and-Avoid – DAA) tekniklerinin ortak kullanılan frekans bantlarında gerçekleştirilmesini zorunlu kılmıştır. UWB dürtü radyoları üzerine kurulu olan ve geçtiğimiz yıllarda onaylanan IEEE 802.15.4a standardı [1] bu durumla ilgili tavsiyelerde bulunmaktadır. Bunlardan bazıları ortak kullanılan iletim bandı yerine

başka bir bant kullanılması, eğer ortak bant kullanılacaksa iletimin geciktirilmesi veya istenilen frekanslarda ani düşüş sağlayabilmek için darbelerin doğrusal birleşimi yöntemi kullanılması olarak özetlenebilir. Bu tavsiyeleri değerlendirecek olursak, düşük maliyetli UWB dürtü radyolarında bant değiştirmek masraflı olabilir. Diğer taraftan ortak bantta oldukça aktif bir birincil sistem olması durumunda UWB sisteminin iletimini geciktirmesi sonucu iletim hızı oldukça yavaşlayabilir. Bu nedenle, bu çalışmada aynı frekans bandında bulunan birincil sistemlere olan girişimleri azaltmak için darbelerin doğrusal birleşimi yöntemi incelenmektedir.

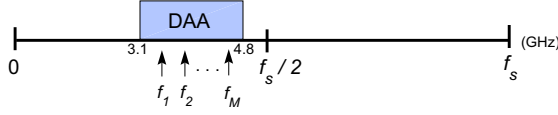
UWB sistemlerinde dalga biçimi ve darbe tasarımları ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Bu çalışmalardan bazıları UWB sistemlerinin kullanması için izin verilen spektrum maskesinde darbe spektrumunun optimizasyonu [2, 3, 4] ve dar bantlı girişim bastırma [5, 6] kategorileri altında özetlenebilir. Bu çalışmalardan çıkan ortak sonuç, içerisinde bulunulan bandın daha verimli kullanılması ve bu bantta istenilen frekanslarda ani düşüş değerleri elde edilmesi sonlu dürtü yanıtı süzgecin (finite impulse response filter - FIR filter) veya kod sözcüğünün yeterli sayıda katsayısı olmasına bağlıdır. Bu katsayıların adedi darbelerin doğrusal birleşiminde kullanılan darbe sayısı ile doğru orantılıdır ki, IEEE 802.15.4a standardı çok az sayıda darbe birleşimi kullanılmasına izin verir.

Yukarıdaki açıklamaları dikkate alarak yapmak istediğimiz, az sayıda katsayı kullanarak IEEE 802.15.4a UWB sistemlerinde istenilen frekans değerlerinde ani düşüş sağlamaktır. Bunun için standartta belirtilen değerler dahilinde darbelerin doğrusal birleşimi kullanılarak oluşan kod spektrumu değerlendirilecektir. Spektrumdaki ani düşüşlerin incelenmesinde z-dönüşümünden yararlanılacaktır. Değerlendirmelerde hangi doğrusal birleşimle istenilen frekans değerlerinde ani düşüş sağlanabileceği sunulacaktır. En son olarak da istenilen ani düşüş sayısını arttırabilmek için bazı önerilerde bulunulacaktır.

### 2. IEEE 802.15.4a Standardı Kanal Özellikleri

IEEE 802.15.4a standardında fiziksel katman ve kullanılan frekans bantları detaylı bir şekilde açıklanmıştır [1]. Buna göre 3.2 – 4.7 GHz ve 6.2 – 10.2 GHz bantlarında herbiri yaklaşık 500 MHz genişliğinde 11 adet örtüşmeyen kanal bulunmaktadır. Bu durumda bu kanallardan birini kullanacak olan UWB dürtü

radıolarının darbe bant genişliği en fazla 500 MHz olmalıdır. Kullanılan kanallarda birincil bir sistemin aktif olması durumunda DAA tekniklerinden birinin kullanılması önkoşul olarak sürülmüştür. Şekil 1’de DAA tekniklerinin önkoşulduğu 3.1 – 4.8 GHz bandı ve bu bantta  $M$  tane ani düşüş yaratılmak istenen



Şekil 1: DAA bandı ve ani düşüş istenen frekansların gösterimi.

frekans gösterilmektedir. Eğer bu ani düşüşler için FIR süzgeç tasarımı kullanılacaksa, örnekleme frekansı  $f_s$ , DAA bandının en yüksek frekansının en az iki katı olmalıdır.

### 3. Darbelerin Doğrusal Birleşimi

IEEE 802.15.4a standardının tavsiyelerinden biri olan darbelerin doğrusal birleşiminde yeni darbe şekli şöyle tanımlanmaktadır:

$$p_{lcp}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n p(t - \tau_n). \quad (1)$$

Burada  $p(t)$  istenilen kanalda kullanılan darbeyi,  $N$  darbe sayısını,  $a_n \in [-1, 1]$  darbe katsayılarını ve  $\tau_n$  darbe gecikmelerini göstermektedir.  $N$ 'nin en büyük değeri 4, darbe gecikmeleri  $0 \leq \tau_n \leq 4$  ns ile sınırlı ve  $\tau_0 = 0$  olarak belirtilmiştir.  $N$ ,  $\{a_n\}$  ve  $\{\tau_n\}$  değerlerinin belirlenmesi gerçekleştirimi yapacak tasarımcıya bırakılmıştır.

Yeni darbe şeklinin frekans bölgesindeki gösterimi

$$\begin{aligned} P_{lcp}(f) &= \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-j2\pi f \tau_n} P(f) \\ &= C(f) \cdot P(f) \end{aligned} \quad (2)$$

şeklindedir. Burada  $C(f)$ , darbe spektrumu  $P(f)$ 'den bağımsızdır ve kod spektrumunu temsil eder. Bu çalışmada darbe tasarımından bağımsız olarak yalnızca kod spektrumu incelenecektir.

#### 3.1. FIR Süzgeç Tasarımı

Kod spektrumu tasarlanırken yaygın olarak tercih edilen FIR süzgeçleri kullanılacaktır. Bunun için ardaşık darbelerin gecikmeleri eşit uzaklıkta olacaktır, yani  $\tau_n = n \cdot \tau_1, \forall n$ . Bu tasarım değişik yöntemler (örneğin, Parks-McClellan yöntemi veya pencereleme yöntemi) kullanılarak elde edilebilir. Ancak önceki çalışmalarda da belirtildiği üzere bunun için çok sayıda katsayıya ihtiyaç duyulacaktır. Asıl amacımız az sayıda katsayı ile istenilen frekanslarda ani düşüş yaratmak olduğu için diğer

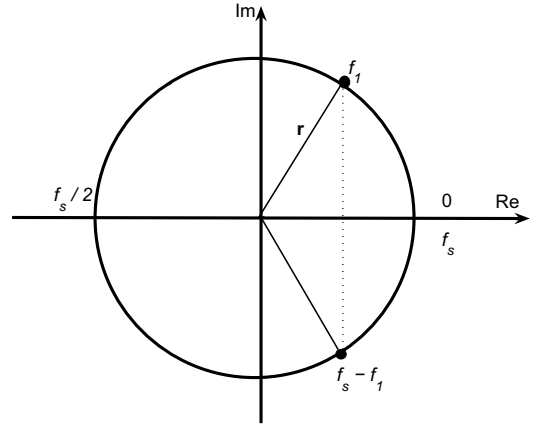
yöntemlerin yerine z-dönüşümündeki birim-çemberin üzerine sıfır yerleştirme yöntemi kullanılacaktır. Buna göre

$$C(f) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-j2\pi f \tau_n} \quad (3)$$

kod spektrumu,  $z = r e^{j2\pi f}$  ( $r = 1$ ) ve örnekleme frekansı  $f_s = \frac{1}{\tau_1}$  kullanılarak z-dönüşümünde

$$C(z) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n z^{-n} \quad (4)$$

olarak gösterilebilir. Şekil 2’de  $f_1$  frekansında elde edilmek istenen ani düşüş için z-dönüşümü kullanımı örneklendirilmiştir.



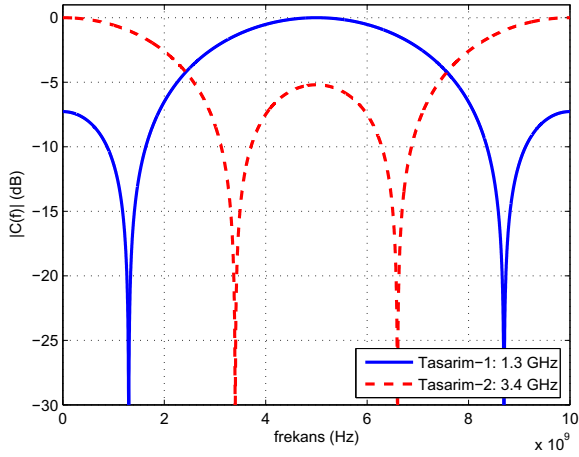
Şekil 2: Z-dönüşümünde birim-çember kullanılarak istenilen frekansta ani düşüş elde edilmesinin örneklendirilmesi.

Buna göre birim-çember üzerinde  $f_1$  frekansına sıfır yerleştirildiğinde, gerçel süzgeç katsayısı elde edebilmek için karmaşık eşleniğine de sıfır konulması zorunludur. Şekilde görüldüğü gibi bu durumda  $f_s - f_1$  frekansında da bir ani düşüş elde edilir. Bu durumda z-dönüşümü

$$\begin{aligned} C(z) &= (z - r e^{j2\pi(f_1/f_s)}) \cdot (z - r e^{-j2\pi(f_1/f_s)}) \\ &= z^2 - 2r \cos(2\pi(f_1/f_s)) z + r^2 \\ &= 1 - 2r \cos(2\pi(f_1/f_s)) z^{-1} + r^2 z^{-2} \end{aligned} \quad (5)$$

olur. Burada  $a_0 = 1$ ,  $a_1 = -2r \cos(2\pi(f_1/f_s))$ ,  $a_2 = r^2$  (sıfırın birim-çember üzerine yerleştirildiği bu özel durum için  $r = 1$ 'dir),  $\tau_0 = 0$ ,  $\tau_1 = 1/f_s$  ve  $\tau_2 = 2/f_s$  değerlerini almıştır. Bu değerler kullanılarak (1)'deki yeni darbe şekli ( $p(t)$ 'nin bilindiği varsayılmaktadır) ve (3)'teki kod spektrumu elde edilir. Şekil 3'te  $f_1 = 1.3$  GHz ve  $f_2 = 3.4$  GHz değerlerinde ani düşüş sağlamış  $f_s = 10$  GHz örnekleme frekanslı süzgeçlerin düzgelmiş kod spektrum mutlak genlik değerleri gösterilmiştir. Daha önce açıklandığı üzere  $f_s - f_1$  değerlerinde de ani düşüşler görülmektedir. Diğer bir gözlem ise istenilen bir frekansta ani düşüş sağlayabilmek için üç tane katsayı kullanma gerekliliğidir.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Birazdan gösterileceği üzere  $f_s/2$  ve  $f_s$  frekanslarında ani düşüş için iki katsayı yeterlidir.



Şekil 3: Kod spektrum mutlak genlik değerleri ve iki ayrı tasarımla elde edilen ani düşüş değerleri.

### 3.2. Darbe Sayısının Etkisi

Bu bölümde örnekleme frekansının  $f_s$  olduğu varsayılarak,  $f_s/2$  frekansına eşit değerde veya bu frekanslardan küçük değerlerde (bkz. Şekil 1) izin verilen  $N \leq 4$  darbe sayısı için kaç tane ani düşüş elde edilebileceği analiz edilecektir.

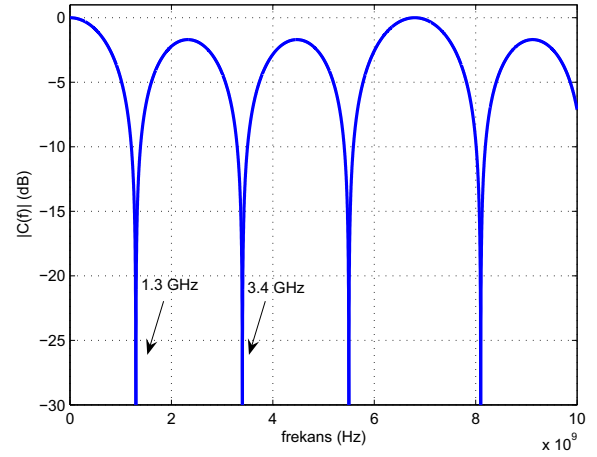
a) *Darbe sayısı  $N = 2$* : İki tane darbe (katsayı) olması  $z$ -dönüşümünün sadece  $C(z) = z \pm 1$  olarak ifade edilmesiyile mümkündür. Bu durumda ani düşüşler yalnızca  $f_s/2$  veya  $f_s$  frekanslarında elde edilebilir. Buna göre  $f_1$  frekansında ani düşüş elde etmek için  $C(z) = z + 1$  denklemi ve  $f_1 = f_s/2$  eşitliği kullanılırsa (yani örnekleme frekansı istenilen ani düşüş frekansının iki katına eşitlenirse) istenilen frekansta ani düşüş elde edilebilir. Diğer taraftan  $f_1 = 0$  ise  $C(z) = z - 1$  denklemi kullanılarak istenilen ani düşüş elde edilebilir.

b) *Darbe sayısı  $N = 3$* : Üç tane darbe olması durumunda yukarıda örneklendirildiği üzere (bkz. Şekil 2)  $0 < f_1 < f_s/2$  değer aralığında bir tane ani düşüş gerçekleştirilebilir. Diğer taraftan  $z$ -dönüşümlerinin  $C(z) = (z-1)^2$ ,  $C(z) = (z+1)^2$  veya  $C(z) = (z-1)(z+1)$  olmaları durumunda sırasıyla  $\{f_1 = 0\}$ ,  $\{f_1 = f_s/2\}$  ve  $\{f_1 = 0, f_2 = f_s/2\}$  değerlerinde ani düşüşler görülür.

c) *Darbe sayısı  $N = 4$* : Dört tane darbe olması durumunda istenilen iki frekansta ani düşüş elde edilebilir. Bunun için ( $f_1 < f_2$  olması koşulu ile)  $f_1$  frekansında birim-çemberin üzerine birbirinin karmaşık eşleniği olan iki sıfır yerleştirilir ve  $f_2 = f_s/2$  koşulu sağlanacak şekilde örnekleme frekansı seçilir. Şekil 4'te bu yöntem kullanılarak  $f_1 = 1.3$  GHz ve  $f_2 = 3.4$  GHz frekanslarında ani düşüş elde edilmiştir. Buna göre  $|C(f)|$ 'in spektrumu 3.4 GHz frekansına göre simetrik, 6.8 GHz frekansına göre periyodiktir.

### 3.3. Darbe Gecikmesinin Etkisi

Darbe gecikmesinin etkisini tartışmak için iki darbenin kullanılması sonucu oluşan  $C(z) = z - 1$  dönüşümünü ele alacağız.

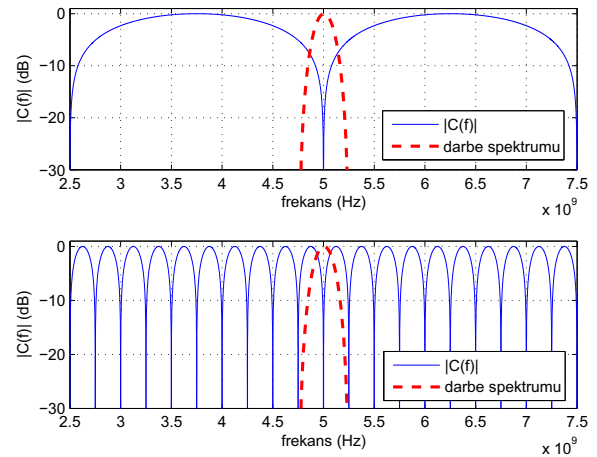


Şekil 4:  $N = 4$  ile istenilen iki frekansta elde edilen ani düşüş değerleri.

Bu durumda kod spektrumu

$$C(f) = 1 - e^{-j2\pi f \tau_1} \quad (6)$$

olarak yazılabilir. Buna göre  $C(f)$ ,  $f_s = 1/\tau_1$  frekansı ile periyodik olur. Gecikme değeri  $\tau_1$  standartta izin verilen  $0 < \tau_1 \leq 4$  ns aralığında seçilmelidir.  $\tau_1 = 4$  ns seçmemiz durumunda, kod spektrumunun periyodu Şekil 5'in alt şeklinde görüldüğü üzere 250 MHz olur. Bu elde edebileceğimiz en düşük periyot



Şekil 5:  $\tau_1 = 0.4$  ns (üst şekil) ve  $\tau_1 = 4$  ns (alt şekil) değerleri için oluşan kod spektrumları.

değeridir. Üst şekilde ise  $\tau_1 = 0.4$  ns değeri için kod spektrumunun 2.5 GHz ile periyodik olduğu görülmektedir. Darbelerin doğrusal birleşimi sonucu elde edilecek yeni darbenin spektrumu, kod spektrumu ile  $p(t)$  darbesinin spektrumunun çarpımı sonucu oluşacaktır. Şekil 5'te görüldüğü üzere kırmızı ile gösterilen darbe spektrumunun kod spektrumu ile çarpımı sonucu oluşacak yeni

spektrumlarından alt şekilde olan daha fazla güce sahip olacaktır. Ancak,  $\tau_1 = 4$  ns civarında seçildiğinde, yeni oluşacak darbeye ikiden fazla darbe kullanılamayacaktır. Bu durumda da birden fazla ani düşüş elde etmek imkansız olacaktır. Ayrıca, kod spektrumu  $1/\tau_1$  ile periyodik olduğu için istenmeyen frekanslarda ani düşüşler gözlenecektir.

#### 4. Öneriler

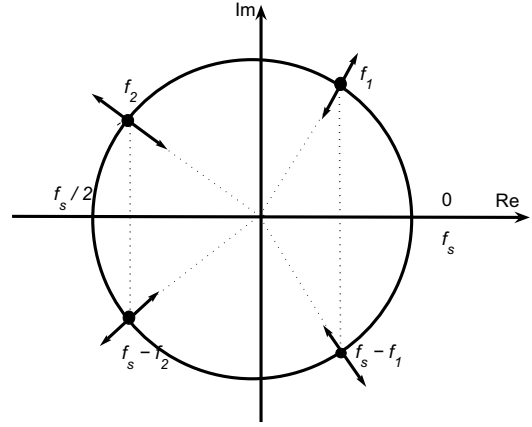
Darbe sayısının etkisi değerlendirilecek olunursa,  $N = 4$  darbe sayısı için istenilen frekanslarda en fazla iki tane ani düşüş elde edilebilir. Ani düşüş sayısını arttırmak için  $N$  değeri artırılmalıdır. Diğer taraftan darbe gecikmesi  $\tau_1 \approx 4$  ns olursa, en fazla  $N = 2$  darbe kullanılabilir. Bu durumda yapılması gereken  $\tau_1$  değerini yeterince küçük seçip,  $N = 4$ 'ten fazla darbe kullanılmalıdır. Bunu yaparken de en fazla  $N = 4$  darbenin önündeki katsayıların mutlak değeri sıfırdan büyük olmalı, geriye kalan darbelerin katsayıları sıfıra çekilmelidir. Bu yaklaşım Şekil 6 ile daha iyi açıklanabilir. Örneğin,  $0 < f_1 < f_2 < f_s/2$  değerlerinde ani düşüş isteniyorsa, bu, sıfırları birim-çember üstüne koyarak beş katsayı (yani  $N = 5$ ) ile sağlanır. Ancak standarda uygun şekilde  $N \leq 4$  darbe kullanılması gerektiği için  $z$ -dönüşümündeki  $z = re^{-j2\pi f}$  ifadesinin  $r$  değeri az bir  $\epsilon$  değeri ile  $r = 1 \pm \epsilon$  olarak değiştirilebilir. Bu durumda  $z$ -dönüşümü

$$C(z) = \prod_{m=1}^M \left( z - r_m e^{j2\pi(f_m/f_s)} \right) \left( z - r_m e^{-j2\pi(f_m/f_s)} \right) \quad (7)$$

olarak yazılabilir. Şekil 6'daki örnekte  $M = 2$  ve  $N = 5$  değerleri kullanılmıştır. Halen devam etmekte olan çalışmamızda  $\{r_m\}$  değerlerini değiştirerek istenilen bazı frekanslarda darbe katsayılarını sıfıra çekmeyi başardık. Bu çalışmanın detaylarını bir başka bildirimizde yayımlayacağız.

#### 5. Sonuç

Bu bildiriye, IEEE 802.15.4a standardındaki tavsiyeler doğrultusunda, birincil sistemlere olan girişimi azaltmak için darbelerin doğrusal birleşimi kullanıldı ve ortaya çıkan kod spektrumundaki ani düşüşler incelendi.  $Z$ -dönüşümü kullanılarak yapılan bu çalışmada, spektrumdaki ani düşüşlerin sayısının sınırlı ve oluşma yerlerinin esnek olmamasının standartta izin verilen darbelerin sınırlı sayıda olması nedeniyle olduğu gösterildi. Ayrıca, istenilen sayıda ve frekanslarda ani düşüş elde edebilmek için önerilerde bulunuldu.



Şekil 6:  $N > 4$  katsayı kullanılması durumunda sıfırların birim-çember üstü yerine birim çember yakınına yerleştirilmesi ile bazı katsayıların sıfıra çekilmesi.

#### 6. Kaynakça

- [1] IEEE Std 802.15.4a-2007, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," 2007.
- [2] X. Wu, Z. Tian, T. N. Davidson and G. B. Giannakis, "Optimal waveform design for UWB radios," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 54, pp. 2009–2021, June 2006.
- [3] I. Dotlic and R. Kohno, "Design of the family of orthogonal and spectrally efficient UWB waveforms," *IEEE Jour. Selected Topics in Sig. Proc.*, vol. 1, pp. 21–30, June 2007.
- [4] Y. Wu, A. F. Molisch, S.-Y. Kung, and J. Zhang, "Impulse radio pulse shaping for ultra-wide bandwidth (UWB) systems," *IEEE Proc. PIMRC '03*, pp. 877–881, Sep. 2003.
- [5] Y. Wang, X. Dong, and I. J. Fair, "Spectrum shaping and NBI suppression in UWB communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, pp. 1944–1952, May 2007.
- [6] Z. Luo, H. Gao, Y. Liu, and J. Gao, "A new UWB pulse design method for narrowband interference suppression," *IEEE Proc. Globecom '04*, pp. 3488–3492, Dec. 2004.