

Gaussian-Modülasyonlu Sinüzoidal UWB İşaretlerle Uyarılmış Omik Yüklü Dipol Antenlerin Geçici Alan Davranışlarının İncelenmesi

Yasin Oğuz¹

Haydar Kaya²

¹Enformatik Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

¹e-posta: oguzy@ktu.edu.tr

²e-posta: hkaya@ktu.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, UWB işaretler ile darband işaretler arasındaki yayılım süreçlerinin farklılığı ve UWB uygulamalarında anten karakteristiğinin ve giriş işaretlerinin etkisi üzerinde durulmuştur. Dipol antenler, kablosuz iletişim sistemleri ve radar uygulamalarında basit yapıları, kolay tasarımı ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada, omik yüklü dipol antenlerin UWB işaretlerle uyarılması durumunda geçici alan davranışları ve uzay-zaman-frekans bölgesi karakteristikleri gösterilmiştir. UWB işaretlerle beslenen omik yüklü dipol antenler için uzay, zaman ve frekans bölgesinde ışıma süreci ve ilişkili parametreleri incelenmiştir.

1. Giriş

Çok kısa süreli temel band işaretler ile iletişim ilkesine dayanan UWB (Pek Geniş Band-Ultra Wide Band) teknolojisi oldukça yeni bir teknoloji olmasına rağmen, bu konuda yapılan çalışmalar 1960'lı yıllara kadar dayanır. UWB terimi ilk olarak 1980'li yıllarda DARPA (US Defense Advanced Research Project Agency) tarafından kullanılmaya başlanmıştır [1,2]. İlk uygulamalar daha çok askeri veya sivil amaçlı radar ve konum belirleme üzerine yoğunlaşmaktadır. Bunun nedeni çok kısa süreli darbelerden oluşan işaretlerin kullanılmasından dolayı zamanlama bilgisinde çok yüksek çözünürlüğe sahip olunabilmesidir. Teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte hızlı ve yüksek kapasiteli kablosuz iletişim sistemlerinin geliştirilmesinde de önem kazanmaya başlamıştır [3].

UWB işaretler genellikle birkaç Hz'den GHz seviyelerine kadar ulaşan bir frekans bölgesine sahip olan nanosaniyelik değişik darbe formlarından oluşur. İşaret gücü spektral yoğunluk olarak çok düşük değerlere sahiptir (tipik olarak birkaç $\mu\text{W}/\text{MHz}$). Kısaca çok geniş bir spektruma yayılan işaret oldukça düzgün ve düşük güçtedir. Düşük kazançlı antenler kullanılsa bile mW'lar veya daha düşük seviyedeki güçlerle birkaç km'lik menziller elde edilebilir [4].

UWB iletişim basit olarak ifade edilecek olursa, çok kısa süreli çeşitli dalga formlarına sahip işaretlerin belli bir darbe tekrarlama periyoduyla kontrol edilerek iletimi ve alımı sürecinden oluşur. Çok büyük bir frekans bölgesine (1 GHz'den büyük) yayılan bir spektruma sahip olan bu işaretler için band genişliği tipik olarak merkez frekansının % 25' inden daha büyüktür. Tablo 1' de gösterildiği gibi UWB işaretler gibi kısa süreli işaretlerin yayılımı, uzun süreli darband işaretlerin yayılımından oldukça farklıdır [5,6].

Tablo 1: UWB işaret ve darband işaret yayılım özelliklerinin karşılaştırılması [5]

Süreç	Darband İşaret	UWB İşaret
İşıma	Tek dalga olarak anten açıklığının tümünden	Farklı dalgalar şeklinde sadece anten açıklığının merkezinden ve kenarlarından
İşıma alanının zamanla değişimi	İşaret dağılımının zamansal türevi olarak	İşaret dağılımının zamansal tekrarı olarak
İşıma alanının genliği	Sadece açısıl koordinatlara bağlıdır	Açısıl koordinatlara ve zamana bağlıdır
İşıma örüntüsü	Sadece açısıl koordinatlara bağlıdır	Açısıl koordinatlara, zamana ve işaretin formuna bağlıdır

UWB iletişim sistemlerinde beklenen performansın sağlanabilmesi için istenilen özelliklerde anten tasarımı önem kazanmaktadır. Çünkü UWB işaretlerin yayılım süreci darband işaretlerin davranışlarından oldukça farklı bir gelişime sahiptir [5]. Özellikle UWB verici ve alıcı sisteminin tüm frekans bölgelerinde ideal olarak frekansın değişimine göre düz bir genlik ve doğrusal bir faz tepkesine sahip olması istenir. Anten özelliklerinin tümü genellikle frekansa bağlı parametrelerdir. Bu nedenle, gönderilen dalga formu anten yapısı tarafından bir çeşit süzgeçlemeye tabi tutulur. Serbest uzay yayılım kanalı için kanal birim vuruş tepkesi yalnızca antenin bu süzgeç karakteristiğine bağlıdır. Bu karakteristikte meydana gelen ideal durumdan sapmalar başlangıç işaretinde bozulmalara neden olacaktır. Bu noktada antenin geçici alan ışıma performansı UWB işaret yayılımını önemli ölçüde etkilemektedir [7,8]. Bu durumda yayılım sürecinin analizi aşamasında darband işaretler için çok uygun olan frekans bölgesi yerine zaman bölgesinde çalışmak daha uygun olmaktadır.

Dipol antenler gibi ince-tel antenler kablosuz iletişim sistemleri ve radar uygulamalarında basit yapıları, kolay tasarımı ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [9].

Bu çalışmada, omik yüklü dipol antenlerin UWB işaretler için geçici alan davranışları ve zaman-frekans bölgesi karakteristikleri incelenmiştir.

2. Omik yüklü dipol anten için ışıma alanının geçici davranışı

2.1. Omik yüklü dipol anten için zaman bölgesinde akım dağılımı

Şekil 1' de gösterilen $2h_t$ boyundaki a_r yarıçaplı, orta noktasından bir uyarım kaynağıyla beslenen Wu-King'in omik yüklü dipol anten modeli için frekans bölgesinde dipol boyunca sıfırıncı dereceden akım dağılımı,

$$I_t(z_t, \omega) = \frac{2\pi}{\eta_0 \psi(0)} V(\omega) \left(\frac{j\omega\tau_t}{1 + j\omega\tau_t} \right) \left(1 - \frac{|z_t|}{h_t} \right) e^{-jk|z_t|} \quad (1)$$

ifadesi ile verilebilir [10-11].

Burada,

$V(\omega)$: dipol antenin uçlarına uygulanan besleme gerilimi

$$\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi \text{ ohm} \quad (2)$$

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad (3)$$

$$\psi(0) = 2 \ln \left(\frac{2h_t}{a_r} \right) \quad (4)$$

olarak yazılabilir [10].

Verici durumundaki dipol anten için zaman bölgesinde akım dağılımı 1. denklemlle verilen $I_t(z_t, \omega)$ ifadesinin ters Fourier dönüşümü ile sağlanabilir.

Böylece zamana bağlı akım ifadesi,

$$I_t(z_t, t) = \mathfrak{S}^{-1} \{ I_t(z_t, \omega) \} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I_t(z_t, \omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (5)$$

$$= \frac{2\pi}{\eta_0 \psi(0)} \left(1 - \frac{|z_t|}{h_t} \right) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega V_g(\omega)}{\omega - (j/\tau_t)} e^{j\omega z_t} d\omega$$

denklemlle verilebilir.

Burada

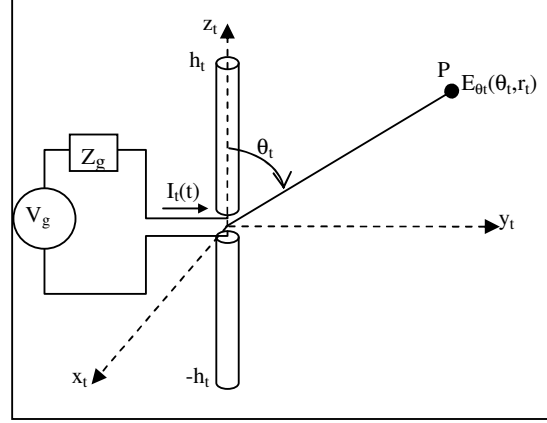
$$\tau_t = h_t/c \quad (6)$$

$$t_z = t - (z_t/c) \quad (7)$$

$V_g(\omega)$: anten uçlarındaki besleme işaretinin Fourier dönüşümünü

\mathfrak{S}^{-1} : ters Fourier dönüşümünü belirtir [11].

τ_t gecikmesi uygulanan işaretin dipolün merkezinden uç noktalarına ulaşması için geçen zamandır.



Şekil 1: Orta noktasından beslenen dipol anten

5. denkleml için

$$\mathfrak{S}^{-1} \left\{ \frac{V_g(\omega)}{\omega - (j/\tau_t)} \right\} = j \int_0^{\infty} V_g(t_z - t') e^{-t'/\tau_t} dt' \quad (8)$$

$$= j \left[V_g(t_z) * (e^{-t_z/\tau_t} U(t_z)) \right]$$

$$\mathfrak{S}^{-1} \left\{ \frac{\omega V_g(\omega)}{\omega - (j/\tau_t)} \right\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega V_g(\omega)}{\omega - (j/\tau_t)} e^{j\omega z_t} d\omega \quad (9)$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^{\infty} V_g(t_z - t') e^{-t'/\tau_t} dt' \right]$$

$$= V_g(t_z) - \frac{1}{\tau_t} \int_0^{\infty} V_g(t_z - t') e^{-t'/\tau_t} dt'$$

dönüşümleri kullanılabilir. 8. denklemindeki '*' işareti evrişim işlemini ifade eder. 8. ve 9. ifadelerini 5. denkleminde kullanırsak zamana bağlı akım ifadesi

$$I_t(z_t, t) = \frac{2\pi}{\eta_0 \psi(0)} \left[1 - \frac{|z_t|}{h_t} \right] \left[\int_0^{\infty} V_g(t_z) - \frac{1}{\tau_t} \int_0^{\infty} V_g(t_z - t') e^{-t'/\tau_t} dt' \right] \quad (10)$$

şeklinde elde edilir [11].

2.2. Omik yüklü dipol anten için zaman bölgesinde alan dağılımı

Şekil 1' de gösterilen dipol anten tarafından ışımlanan alan ifadesi frekans bölgesinde ($Z_g(\omega) = 0$ olarak alınırsa),

$$E_{\theta_t}(r_t, \theta_t, \omega) = - \frac{kh_t V_g(\omega)}{\psi(0)(1 + jkh_t)} \frac{e^{-jk r_t}}{r_t} F_1(kh_t, \theta_t) \quad (11)$$

denklemlle gösterilebilir.

Burada

$$F_t(kh_t, \theta_t) = \frac{1}{kh_t \sin^3 \theta_t} \times \left[-jkh_t \sin^3 \theta_t + (1 + \cos^2 \theta_t) - \frac{1}{2}(1 + \cos \theta_t)^2 e^{-jkh_t(1 - \cos \theta_t)} - \frac{1}{2}(1 - \cos \theta_t)^2 e^{-jkh_t(1 + \cos \theta_t)} \right] \quad (12)$$

olarak verilir.

Zaman bölgesinde verici dipol anten tarafından ışınlanan alan ifadesi ise 11. denklemindeki alan ifadesinin ters fourier dönüşümü ile sağlanabilir. Buradan zamana bağlı alan ifadesi

$$E_{\theta}(r_t, \theta_t, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\theta}(r_t, \theta_t, \omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (13)$$

şeklinde yazılabilir. 11. denkleminde yerine konulup 8. ve 9. ifadelerindeki dönüşümler uygulanırsa zamana bağlı alan dağılımı

$$E_{\theta}(r_t, \theta_t, t) = A(r_t, \theta_t) \left[\sin^2 \theta_t V_g(t^*) - \frac{2}{\tau_t} \int_0^{\infty} V_g(t^* - t') e^{-t'/\tau_t} dt' + \frac{(1 + \cos \theta_t)^2}{2\tau_t} \int_0^{\infty} V_g(t_1 - t') e^{-t'/\tau_t} dt' + \frac{(1 - \cos \theta_t)^2}{2\tau_t} \int_0^{\infty} V_g(t_2 - t') e^{-t'/\tau_t} dt' \right] \quad (14)$$

ifadesi ile verilebilir.

Burada

$$A(r_t, \theta_t) = 1/[r_t \psi(0) \sin^3 \theta_t] \quad (15)$$

$$t^* = t - \frac{r_t}{c} \quad (16)$$

$$t_1 = t^* - \tau_t(1 - \cos \theta_t) \quad (17)$$

$$t_2 = t^* - \tau_t(1 + \cos \theta_t) \quad (18)$$

$$\tau_t = h_t/c \quad (19)$$

$$c = 3.10^8 \text{ m/sn}$$

olarak yazılabilir [11].

Omik yüklü dipol antenin zamana bağlı alan dağılımını veren 14. denklemini irdelenecek olursak; birinci ve ikinci terim, P noktasındaki toplam alanın dipolün merkezinden ışınlanan alan bileşenlerini göstermektedir. Üçüncü ve dördüncü terim ise dipolün uç noktalarından ışınlanan alan bileşenlerini göstermektedir.

3. Gaussian-modülasyonlu sinüzoidal UWB işaretler

Gaussian dağılımına sahip bir UWB işaret,

$$V_g(t) = Ae^{-(t/\tau)^2} \quad (20)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada

A: işaretin maksimum genliğini

τ : darbenin süresini

göstermektedir.

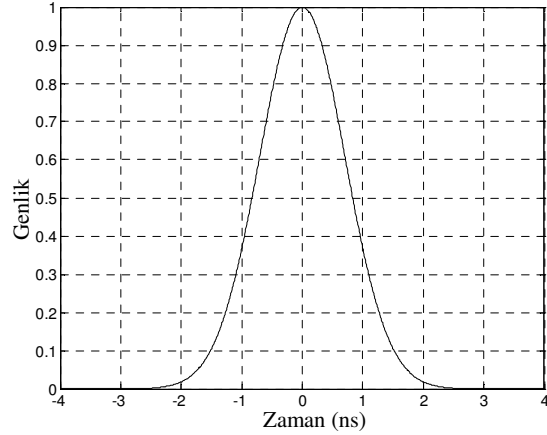
20. denkleminde verilen zaman ekseninde gaussian dağılımlı işaretin frekans bölgesindeki dağılımı,

$$V_g(f) = \mathfrak{F}\{V_g(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} Ae^{-(t/\tau)^2} e^{-j2\pi ft} dt \quad (21)$$

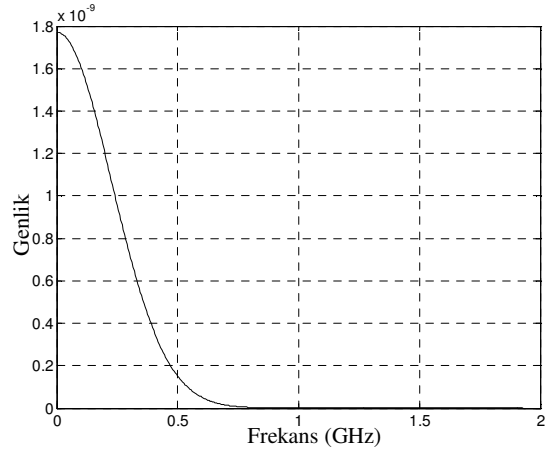
$$= A\tau\sqrt{\pi}e^{-(\pi\tau f)^2}$$

olarak elde edilir [12].

Şekil 2' de $A=1$, $\tau=1\text{ns}$ için gaussian dağılımlı işaretin zaman göre değişimi, Şekil 3' de ise Şekil 2' de verilen işaretin frekans bölgesindeki dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 2: Gaussian dağılımlı UWB işaret



Şekil 3: Gaussian dağılımlı UWB işaretin frekans dağılımı

Şekil 3'e bakıldığında gaussian dağılımlı işaretin en yüksek frekans bileşenine DC değerinde sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu frekans dağılımının, belirli bir merkez frekansında en yüksek bileşen değerine sahip olabilmesi için gaussian-modülasyonlu sinüzoidal işaretler kullanılabilir. Gaussian-modülasyonlu sinüzoidal işaret,

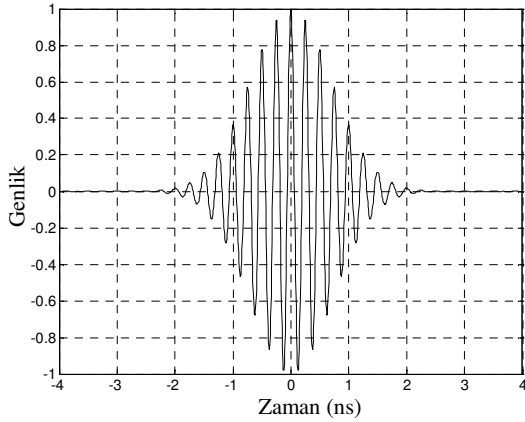
$$V_g(t) = Ae^{-(t/\tau)^2} \cos(2\pi f_c t) \quad (22)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada f_c , maksimum frekans bileşenine sahip merkez frekansını göstermektedir.

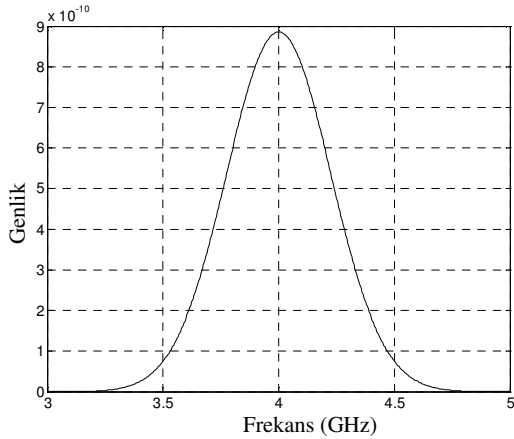
Zaman ekseninde dağılımı 22. denkleminde verilen gaussian-modülasyonlu sinüzoidal işaretlerin frekans bölgesindeki dağılımı,

$$\begin{aligned} V_g(f) = \mathfrak{F}\{V_g(t)\} &= \int_{-\infty}^{\infty} Ae^{-(t/\tau)^2} \cos(2\pi f_c t) e^{-j2\pi ft} dt \\ &= \frac{A}{2} \tau \sqrt{\pi} (e^{-\pi\tau(f-f_c)^2} + e^{-\pi\tau(f+f_c)^2}) \end{aligned} \quad (23)$$

olarak elde edilir [12]. Şekil 4'de $A=1$, $\tau=1$ ns, $f_c=4$ GHz için gaussian-modülasyonlu sinüzoidal işaretin zaman göre değişimi, Şekil 5' de ise Şekil 4' de verilen işaretin frekans bölgesindeki dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4: Gaussian-modülasyonlu sinüzoidal dağılımlı UWB işaret



Şekil 5: Gaussian-modülasyonlu sinüzoidal dağılımlı UWB işaretin frekans dağılımı

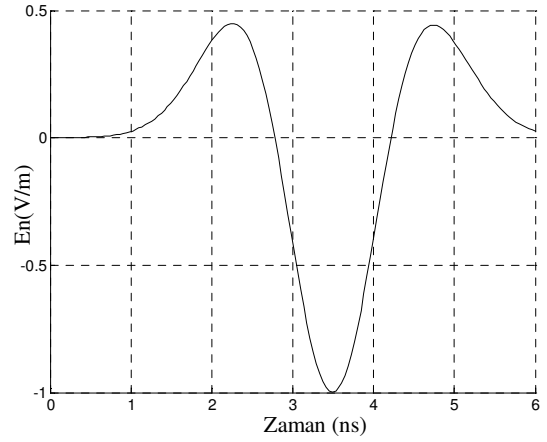
4. Benzetim sonuçları

Şekil 1' deki gibi omik yüklü dipol antenin gaussian dağılımına sahip bir UWB işaretle ve gaussian-modülasyonlu sinüzoidal bir UWB işaret ile uyarılması durumunda anten tarafından yayımlanan alan için yapılan benzetim çalışmalarının sonuçları aşağıda gösterilmiştir.

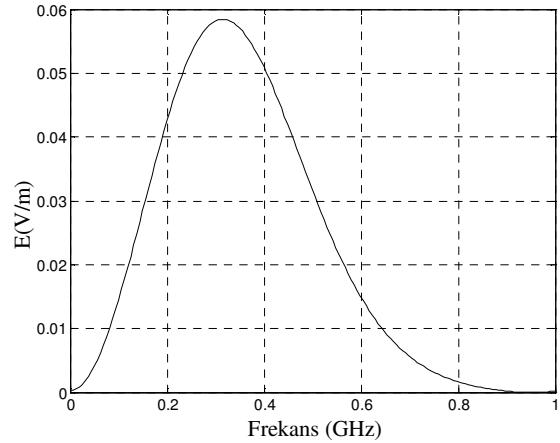
Bütün benzetim sonuçlarında $h_t=3.75$ cm, $a=1$ mm, $r_t=1$ m olarak alınmıştır.

14. denkleminde $V_g(t)$ giriş işareti yerine 20. denkleminde gerekli integrasyon ifadeleri alınarak Şekil 2.' deki dağılıma sahip gaussian dağılımlı UWB işaret için alan dağılımının zamana bağlı ifadesi elde edilmiştir.

$\theta_t = 90^\circ$ için Şekil 6' da normalize elektrik alanın (E_n) zamanla değişimi, Şekil 7' de elektrik alan genliğinin frekansla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6: $\theta_t = 90^\circ$ için normalize elektrik alanın zamanla değişimi

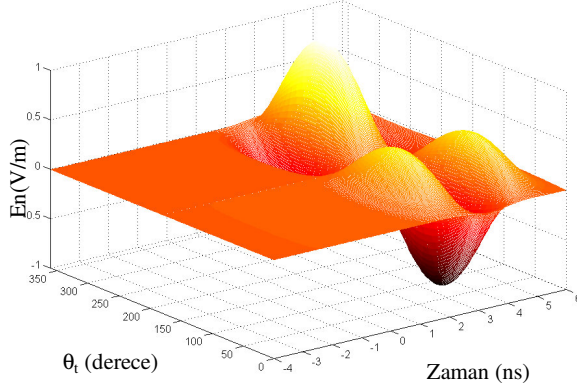


Şekil 7: $\theta_t = 90^\circ$ için elektrik alan genliğinin frekansla değişimi

Şekil 6' da ışınım alanının normalize değerinin zamanla değişimi incelendiğinde Şekil 2' deki giriş işaretinin formunun değiştiği gözlenmektedir.

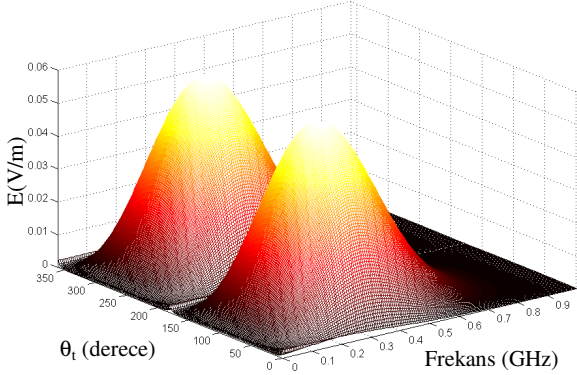
Şekil 7' de ışınım alanının genliğinin frekansla değişimi incelendiğinde Şekil 3' deki frekans dağılımının değiştiği görülmektedir.

Şekil 1' deki dipol antenin Şekil 2' de verilen gaussian dağılımlı UWB işaretle uyarılması durumunda anten tarafından ışınlanan alanın uzay-zaman dağılımı Şekil 8' de verilmiştir. Burada $\theta_t = 0-360^\circ$ arasında normalize alan dağılımının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 8: Normalize elektrik alanın uzay-zaman dağılımı

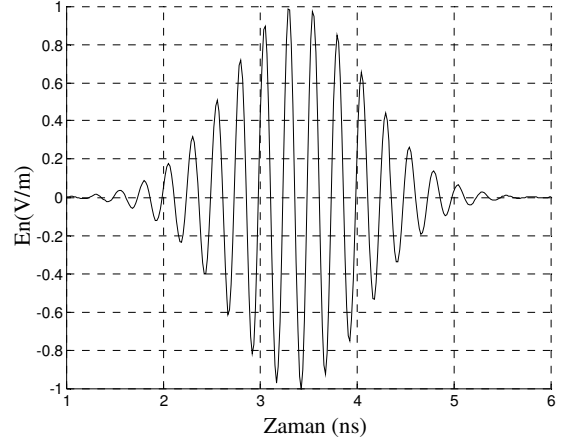
Şekil 1' deki dipol antenin Şekil 2' de verilen gaussian dağılımlı UWB işaretle uyarılması durumunda anten tarafından ışınlanan alanın uzay-frekans dağılımı Şekil 9' da verilmiştir. Burada $\theta_t = 0-360^\circ$ arasında elektrik alan genliğinin frekansa bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 9: Elektrik alan genliğinin uzay-frekans dağılımı

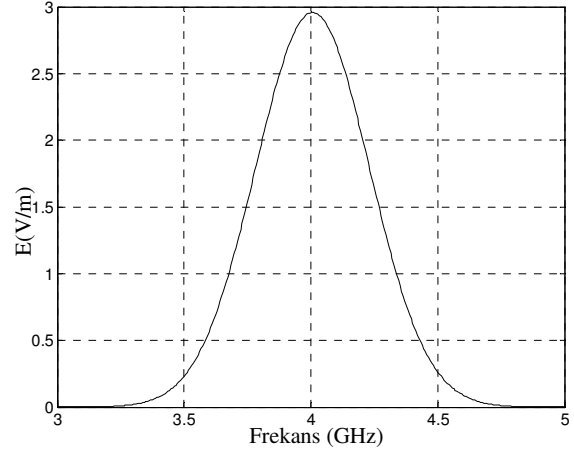
14. denkleminde $V_g(t)$ giriş işareti yerine 22. denklemin konulup gerekli integrasyon ifadeleri alınarak Şekil 4' deki dağılıma sahip gaussian-modülasyonlu sinüzoidal UWB işaret için alan dağılımının zamana bağlı ifadesi elde edilir.

Şekil 10' da $\theta_t = 90^\circ$ için normalize elektrik alanının (E_n) zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 10: $\theta_t = 90^\circ$ için normalize elektrik alanın zamanla değişimi

Şekil 10' da ışınım alanının normalize değerinin zamanla değişimi incelendiğinde Şekil 4' deki giriş işaretinin formunun değişmediği görülmektedir.

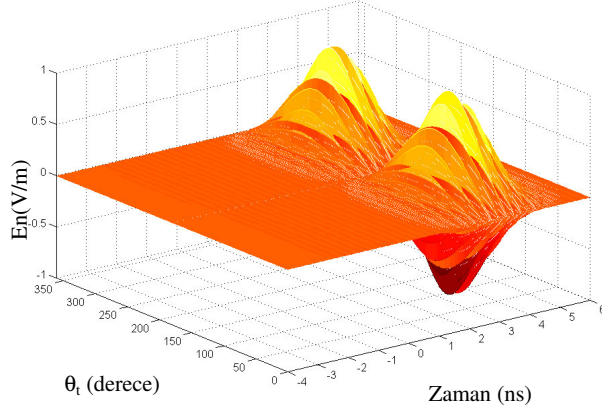


Şekil 11: Elektrik alan genliğinin uzay-frekans dağılımı

Şekil 11' de ışınım alanının genliğinin frekansla değişimi incelendiğinde Şekil 5' deki frekans dağılımının değişmediği görülmektedir.

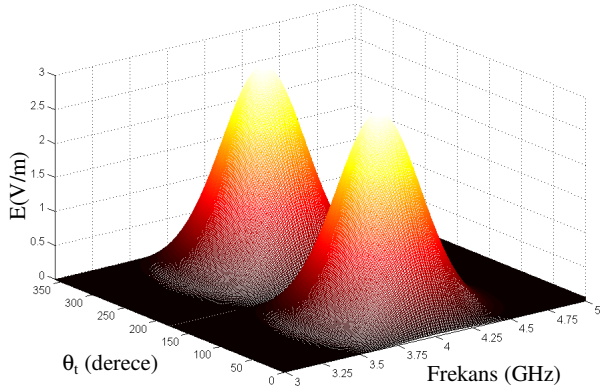
Şekil 1' deki dipol antenin Şekil 4' de verilen gaussian-modülasyonlu sinüzoidal bir UWB işaretle uyarılması durumunda anten tarafından ışınlanan alanın uzay-zaman dağılımı Şekil 12' de verilmiştir. Burada $\theta_t = 0-360^\circ$ arasındaki normalize alan dağılımının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.

Şekil 8 ve Şekil 12' deki normalize elektrik alanın uzay-zaman dağılımları incelendiğinde, Şekil 8' deki alan dağılımının zamansal değişiminin Şekil 2' deki giriş işaretinin zamana göre değişiminden farklı olduğu, Şekil 12' deki alan dağılımının zamansal değişiminin ise Şekil 4' deki giriş işaretinin zamana göre değişimiyle aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 12: Normalize elektrik alanın uzay-zaman dağılımı

Şekil 1' deki dipol antenin Şekil 4'de verilen gaussian-modülasyonlu sinüzoidal bir UWB işaretle uyarılması durumunda anten tarafından ışınlanan alanın uzay-frekans dağılımı Şekil 13'de verilmiştir. Burada $\theta_t = 0-360^\circ$ arasında elektrik alan genliğinin frekansa bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 13: Elektrik alan genliğinin uzay-frekans dağılımı

Şekil 9 ve Şekil 13' deki elektrik alan genliğinin uzay-frekans dağılımları incelediğinde, Şekil 9' daki alan genliğinin frekansa göre değişiminin Şekil 3' deki giriş işaretinin frekansa göre değişiminden farklı olduğu, Şekil 13' deki alan genliğinin frekansa göre değişiminin ise Şekil 5' deki giriş işaretinin frekansa göre değişimiyle aynı olduğu görülmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, UWB uygulamalarında anten karakteristiğinin ve giriş işaretlerinin etkisi üzerinde durulmuştur. UWB işaretlerle beslenen omik yüklü dipol antenler için uzay, zaman ve frekans bölgesinde ışınma süreci ve ilişkili parametreler incelenmiştir. Verilen benzetim sonuçlarından da görüldüğü üzere UWB işaret yayını darband işaret yayınına göre farklı parametrelere göre değişim göstermektedir. UWB işaretler geniş bir frekans bandına

sahip oldukları için işaretin frekans bileşenlerinin antenin frekans karakteristiğine bağlı olarak ışınma alanı bileşenlerine katkısı farklı olmaktadır. Ayrıca giriş işaretlerinin zaman ve frekans bölgesindeki dağılımı yayımlanan alan üzerinde etkili olmaktadır.

Burada verilen sonuçlar dışında genel ışınma ifadeleri kullanılarak farklı dağılıma sahip giriş işaretleri için de alan dağılımları incelenebilir. Ayrıca yapılan analiz farklı yapıdaki anten dizilerinin çeşitli UWB işaretlerle beslenmesi durumunda ışınma alanı dağılımı dalga formuna ve dizi parametrelerine bağlı olarak da çıkartılabilir.

6. Kaynakça

- [1] Taylor, J. D., "Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems", CRC Press, Boca Raton, Florida, 1995.
- [2] Taylor, J.D., "Ultra Wideband Radar Technology", CRC Press, 2001.
- [3] Gu, X., Taylor, L., "Ultra-Wideband and Its Capabilities", BT Technology Journal, Vol. 21, No. 3, June, 2003.
- [4] Mihai, B., "Ultra Wide Band Technologies", Ad Hoc Mobile Wireless Networks-Research Seminar on Telecommunications Software, 2002.
- [5] Immoreev, I. I., Sinyavin, A. N., "Features of Ultra-Wideband Signal' Radiation", IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2002.
- [6] Sagnard, F., Uguen, B., El Zein, G., "Reception of An Oblique Electromagnetic Plane Wave by A Linear-Wire Antenna: A Time Domain Analysis", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 38, No. 4, August 2003.
- [7] Sagnard, F., Vignat, C., "Extension of Analytical Modelling of Resistive Loaded Thin -Wire Antennas to Gaussian Derivatives Excitations", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 47, No. 6, December 2005.
- [8] Sörgel, W., Wiesbeck, W., "Influence of Antennas on the Ultra-Wideband Transmission", EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005.
- [9] Li, H. F., Chen, Z. N., Li, L. W., "Investigation of Time Domain Characteristics of Thin Wire Antennas", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 43, No. 3, November, 2004.
- [10] Liu, Y.P., Sengupta, D.L., "Transient Radiation from a Linear Antenna with Nonreflecting Resistive Loading", IEEE, Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-22, No. 2, March 1974.
- [11] Samaddar, S.N., Mokole, E.L., "Transient Behavior of Radiated and Received Fields Associated with A Resistively Loaded Dipole", Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 4, Kluwer Academic / Plenum Publishers New York, 1999.
- [12] Ghavami, M, Michael, L.B, Kohno, R., " UltraWideband Signals and Systems in Communication Engineering", John Wiley & Sons, 2004.