RADAR UYGULAMALARINDA DÖNGÜSEL-DURAĞANLIĞA DAYALI İŞARET ANALİZİ İLE HELİKOPTER TESPİTİ

Işıl Yazgan BİRİNCİ, Yalçın TANIK Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Ankara iyazgan@metu.edu.tr, tanik@metu.edu.tr

Özet: Bu bildiride, radar uygulamalarında helikopter tespiti amacıyla (özellikle havada asılı duran –hovering– helikopterler için) döngüsel-durağanlığa (cyclostationary) dayalı bir işaret analiz yöntemi sunulmaktadır.

Helikopter Doppler izi, doğasından kaynaklanan bir döngüsel durağanlık içermektedir. Özellikle helikopter pallerinin hareketinden kaynaklanan Doppler izindeki çakıp sönmeler (flash) literatürdeki analizlerde kullanılmamaktadır[1-4]. Helikopter tespitinde kullanılabilecek tanımlayıcı bir bilgi olan bu çakıp sönmeleri de içeren yeni bir helikopter işaret modeli tanımlanmıştır. Bu model kullanılarak döngüsel-durağan sinyal analizi ile helikopter tespiti üzerinde çalışılmıştır.

1. Giriş

Döngüsel-durağan işaret analizi, iletişim, radar ve sonar uygulamalarında giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu ilginin en önemli nedenlerinden biri, bu yöntemin işaretlerde saklı bulunan dönemli süreçleri açığa çıkararak daha iyi işaret seçiciliği sağlamasıdır.

Radar uygulamalarında helikopter tespiti halen tam olarak çözülmemiş önemli problemlerden biridir. Döngüseldurağan işaret analizi bu probleme yeni bir bakış açısı getirmektedir. Ayrıca bu bildiride, literatürdeki modellere göre daha gerçekçi bir helikopter Doppler işareti modeli önerilmektedir.

2. Helikopter Geri Saçılım Bileşenleri Hakkında Önbilgi

Helikopterin radar yankısı çeşitli geri saçılım bileşenlerinin toplamı olarak modellenebilir:

- Gövde yankısı: Sadece birkaç metrekarelik radar kesitine sahip sabit kanatlı bir hava aracının radar yankısını andırır. Özellikle havada asılı duran helikopterlerin gövde yankısı, yerden kaynaklanan gürültü (ground clutter) arasında kaybolabilir.
- Ana pervane yankısı: Ana pervanenin periyodik dönüşü, radar yankısında genlik ve faz modülasyonuna yol açar. Bu modülasyon bileşenleri sabit kanatlı hava araçları ile helikopterlerin radar yankısı arasındaki ana farklılıktır. Dolayısıyla, özellikle havada asılı duran helikopterlerin tespitinde kullanılabilecek temel unsurdur. Radarın hedef üzerinde kalma süresi darbe sıklığına göre çok daha kısa olduğu için bu kısa darbeler farkedilmeyebilir [2].
- Kuyruk pervanesi yankısı: Ana pervaneye çok benzemekle birlikte bu pervanenin yankıları daha küçük genlikli ve daha sıktır. Kuyruk pervanesi genellikle gövdenin arkasına saklandığı için yankısı radarda görünmez [2].

3. Önerilen Helikopter Sinyal Modeli

Helikopter radar yankısı için aşağıdaki alçak geçiren eşlenik model önerilmektedir. Bu model, literatürdeki çalışmalara [3], helikopter pallerinin hareketinden kaynaklanan Doppler izindeki çakıp sönmeleri eklemektedir:

$$r(t) = e^{j2\pi f_d t} \left[s(t) + \sum_k rect\left(\frac{t - kT_0}{\tau_0}\right) w(t) \right] + n(t)$$
(1)

Yukarıdaki denklemde üstsel terim helikopter gövdesinin hareketinden kaynaklanan f_d frekansındaki Doppler kayması ve s(t) havada asılı duran helikopterden yansıyan sinyaldir. Radarın hedef üzerinde kalma zamanı yeteri kadar uzun tutulduğunda ve yüksek radar darbe tekrarlama sıklığı için, bu durağan sinyalin güç spektrum yoğunluğu (power spectral density) Şekil 1'de verildiği gibidir [3]. Ana pervane yankısı, düzgün güç spektrum yoğunluğuna sahip beyaz karmaşık Gauss gürültüsünün dikdörtgen pencere serisi ile çarpımı olarak modellenmiştir. Çakıp sönmelerin aralığı T_0 ve uzunluğu τ_0 ile betimlenmiştir. Çalışmanın basitliği açısından n(t) beyaz karmaşık Gauss gürültüsü olarak modellenmiştir.



Şekil 1. s(t)'nin güç spektrum yoğunluğu

 ω_r ana rotorun açısal frekansı, *D* pervanenin çapı, λ ise radar sinyalinin dalga boyudu olarak tanımlandığında, ana pervanenin uç hızına bağlı olan maximum Doppler kayması aşağıdaki gibidir:

$$f_{\max} = 2\omega_r \frac{D}{\lambda} \tag{2}$$

4. Döngüsel-Durağan İşaret Analiz Yöntemi

Bu bölümde, döngüsel-durağan işaret analiz yöntemi hakkında önbilgi verilmektedir. Bu teori ve uygulamaları hakkında ayrıntılı bilgi kaynakta bulunmaktadır [5].

Durağan işaretlerin özilinti fonksiyonu, bu fonksiyonun hesaplandığı zamandan bağımsız olarak, sadece gecikmeye (lag) bağlıdır. Ancak, dönüsel durağan bir işaretin özilinti fonksiyonu zamana göre periyodik olarak değişir. x(t) ile belirtilen döngüsel-durağan bir işaretin t anında τ gecikme için özilinti fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$R_x(t,\tau) = R_x(t+nT_0,\tau) \quad \forall n \in \mathbb{Z}$$
(3)

Dolayısıyla, t parametresine göre T_0 dönemi ile döngüsel olan bu fonksiyon, Fourier serisi açılımı ile gösterilebilir:

$$R_x(t,\tau) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_x^{\alpha}(\tau) e^{j2\pi\alpha t}$$
(4)

Bu Fourier katsayıları aşağıdaki gibi gösterilebilir. Bu fonksiyon Döngüsel Özilinti Fonksiyonu (Cyclic Autocorrelation Function) olarak adlandırılır.

$$R_{x}^{\alpha}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau/2)x^{*}(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t}dt$$
(5)

5. Helikopter Sinyal Modelinin Döngüsel-Durağan İşaret Analizi

Uygulama kısıtları nedeniyle, döngüsel özilinti fonksiyonunun sınırlı tümlev zamanı için yaklaşımı kullanılmıştır. (1) ile belirtilen helikopter radar yankısını oluşturan sinyallerin birbirinden bağımsız olduğu dikkate alındığında, uzun tümlev zamanı için döngüsel özilinti fonksiyonu aşağıdaki gibi verilebilir:

$$R_r^{\alpha}(\tau)_T = \int_T r(t+\tau/2)r^*(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha d}dt$$

$$= e^{j2\pi f_d \tau} \left[R_s^{\alpha}(\tau)_T + R_w^{\alpha}(\tau)_T \right] + R_n^{\alpha}(\tau)_T$$
(6)

Bu gösterimdeki terimler aşağıda detaylandırılmıştır.

$$R_{s}^{\alpha}(\tau)_{T} = \int_{T} s(t+\tau/2)s^{*}(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t}dt$$
(7a)

$$R_{w}^{\alpha}(\tau)_{T} = \int_{T} \sum_{k} \sum_{m} \operatorname{rect}\left(\frac{t+\tau/2-kT_{0}}{\tau_{0}}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{t-\tau/2-mT_{0}}{\tau_{0}}\right) w(t+\tau/2) w^{*}(t-\tau/2) e^{-j2\pi\alpha t} dt$$
(7b)

$$R_{n}^{\alpha}(\tau)_{T} = \int_{T} n(t + \tau/2) n^{*}(t - \tau/2) e^{-j2\pi\alpha t} dt$$
(7c)

s(t) ve n(t) durağan olduğu için, uzun tümlev zamanında, $R_s^{\alpha}(\tau)_T$ ve $R_n^{\alpha}(\tau)_T$ sadece döngü sıklığı $\alpha = 0$ için sıfırdan farklıdır. Ayrıca tüm durağan gürültü sinyalleri için de yine sadece döngü sıklığı $\alpha = 0$ için $R_n^{\alpha}(\tau)_T$ sıfırdan farklıdır. (7b) de görüldüğü gibi $R_w^{\alpha}(\tau)_T$ gecikme parametresi τ 'da T_0 periyoduyla döngüsel özellikler içermektedir. Döngü sıklığı parametresi α 'da da hedefin Doppler izini belirten döngüsel özellikler bulunur.

6. Sonuçlar

4. bölümde önerilen yeni helikopter işaret modeli ve 5. bölümde aktarılan yöntem kullanılarak alınan sonuçlar bu bölümde kısaca belirtilmiştir. Yer kısıtlaması nedeniyle ayrıntılı analizler verilememiştir.

Şekil 2.a'da 100MHz örnekleme hızında alınan 100ms'lik bir işaret için 32 nokta FFT alınarak oluşturulan döngüsel özilinti fonksiyonu verilmiştir. Bu benzetimde, helikopterin çakıp sönme aralığı $T_0 = 30$ ms, uzunluğu $\tau_0 = 0.5$ ms olarak alınmıştır. Şekil 2.b'de ise, 10000 nokta FFT alınarak spektrum oluşturulmuştur.



Şekil 2. Helikopter veri modeli ile Döngüsel Özilinti (a) ve Fourier Dönüşümü (b).

Yaklaşık 10dB işaret gürültü güç oranında yapılan benzetim çalışmalarında Şekil 2.a'da durağan gürültünün etkisi görülmemektedir. Bunun nedeni, yeteri kadar uzun veri için, sıfır dışındaki döngü sıklıklarında $R_n^{\alpha}(\tau)_T$ 'nın sıfır olmasıdır. Ayrıca, 30ms aralıkla gerçekleşen çakıp sönmeler Şekil 2.a'da açıkça görülmektedir. (6)'da görüldüğü gibi, helikopterin ana gövdesine ait Doppler kayması f_d döngüsel özilinti fonksiyonunun genliğine etkimemektedir. Bunun dışında, havada asılı duran helikopterler için, helikopterin radar kesiti ve dolayısıyla helikopter radar yankısı işareti çakıp sönme periyoduyla tekrarlayan yüksek bir ilinti içermektedir. Yani, helikopter işaretinin özilinti fonksiyonu çakıp sönme periyoduyla periyodiktir. Bu bilgiyi kullanması nedeniyle, döngüsel-durağan işaret analizinin, literatürdeki diğer yöntemlere, örneğin kısa zamanlı Fourier dönüşümüne (STFT) göre daha iyi sonuç vermesi beklenmektedir.

Sonuç olarak, bu bildiride literatürdekilere göre daha gerçekçi bir helikopter radar yankısı modeli tanımlanmış ve helikopter tespiti için döngüsel-durağan işaret analizi yöntemi başarıyla uygulanmıştır.

Kaynaklar

- [1] W.A.Gardner, Statistical Spectral Analysis: A Nonprobabilistic Theory. New Jersey: Prentice Hall, 1987.
- [2] Misiurewicz, J.; Kulpa, K.; Czekala, Z., "Analysis of recorded helicopter echo", Radar 97, 14-16 Ekim. 1997.
- [3] Gini, F.; Farina, A., "Matched subspace CFAR detection of hovering helicopters", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 35, s.1293 – 1305, Ekim. 1999.
- [4] Misiurewicz, J.; Kulpa, K.; Czekala, Z., "Analysis of radar echo from a helicopter rotor hub", MIKON '98, 12th International Conference on Microwaves and Radar, 20-22 Mayıs 1998.
- [5] W.A.Gardner, Cyclostationarity In Communications and Signal Processing. New York: IEEE Press, 1994.