

# Dönüşüm Uzayı Tabanlı Uyarlanırlı Süzgeç ile SWHF Radarda Deniz-Kargaşasının Bastırılması<sup>1</sup>

Yıldırım Bahadırlar, İ. Bülent Özge\*  
TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi  
Bilişim Teknolojileri Araştırma Enstitüsü  
Gebze, Kocaeli  
ybahadir@btae.mam.gov.tr, \*bozge@btae.mam.gov.tr

**Özet:** Bu çalışmada SWHF radarda deniz-kargaşasının bastırılması amacıyla Fourier dönüşüm uzayında, Menzil-Doppler çerçeveleri üzerinde çalışan bir uyarlanırlı süzgeç önerilmektedir. Süzgece girecek referans sinyali Menzil-Doppler çerçevesinde kayan Hamming pencere işlevi yardımıyla elde edilmektedir. Yakınsama özelliği hızlı olan süzgeç ile Doppler spektrasındaki 1. ve 2. derece Bragg saçılma bölgeleri başarılı biçimde bastırılarak nesnelere ilişkin Doppler işaretlerinde belirgin iyileşme sağlanmaktadır. Süzgeç başarımına ilişkin sonuçlar üst HF bandında, değişik deniz durumlarında ve değişik işaret-gürültü-oranlarında verilmiştir.

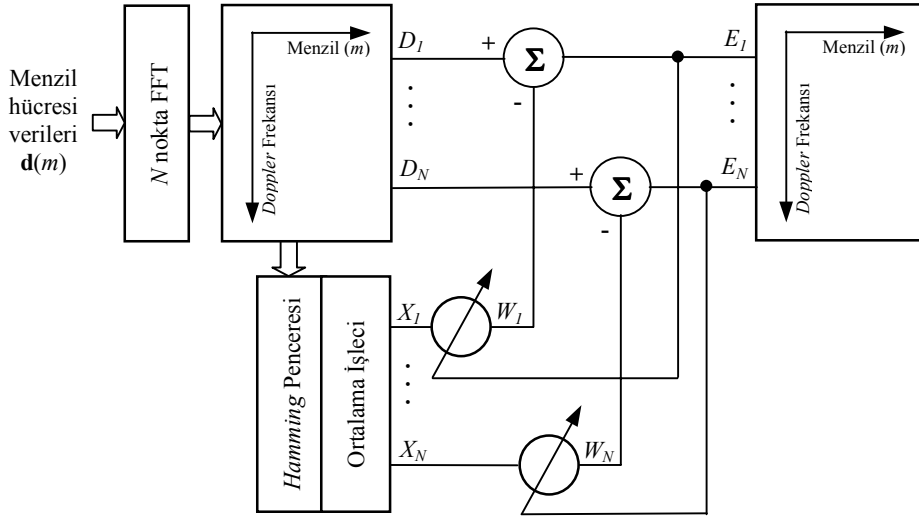
## 1. Giriş

SWHF (*Surface Wave High Frequency*) radarda denizin dalgalı yüzeyinin saçıcı etkisi nedeniyle geri dönen sinyallerde yüksek düzeyde kargaşa işareti oluşur. Bu güçlü kargaşa özellikle, düşük Doppler kayması oluşturan ve küçük Radar Kesit Alanına (RKA) sahip hedefleri gölgeler ve algılanmasını önemli ölçüde engeller. SWHF radar Doppler spektrasında deniz kaynaklı kargaşa bileşenlerinin bastırılması algılamadaki bu sınırlamayı azaltmada önem taşır.

SWHF radarda elde edilen Doppler spektrasının modellenmesinde, deniz dalgası ile radar dalgası etkileşimi ve deniz dalgalılık durumu (deniz spektrasi) iki ana etken olarak rol oynar. Crombie, bu etkileşimde spektrada yer alan 1. derece baskın tepelerin Rezonans Bragg Saçılma (*Resonance Bragg Scattering*) koşuluna göre oluştuğunu göstermiştir [1]. Spektrodaki 1. derece tepelere göre daha küçük, ancak daha yaygın ve karmaşık 2. derece süre (continuum) bileşenleri, çok sayıda iki deniz dalga bileşeninin radar bakış açısı doğrultusunda, EM dalga boyunun yarısına eşit olacak biçimde vektörel toplam oluşturması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu temele dayanarak Barrick ve Lipa, 1. ve 2. derece Bragg saçılma mekanizmasını oluşturarak SWHF Doppler spektrasını modellemiştir [2], [3]. Önceki çalışmada Özge ve Bahadırlar kapalı denizlerin Doppler spektrasındaki etkisini oşinografik parametrelere bağlı olarak incelemiştir [4]. Dalgalılık rejimi tam olarak oluşmamış kapalı denizlerde kabarma alanı uzunluğunun baskın bir parametre olarak üst HF bandında (15-30MHz) Doppler spektrasındaki süre bölgesinde doluluğu önemli derecede arttırdığı gösterilmiştir. Ayrıca, kapalı denizlerde üst HF bandında, alt HF bandına (3-15MHz) göre taşıyıcı frekansın yüksekliği nedeniyle doluluk önemli ölçüde artmaktadır [4]. Bu nedenle SWHF radarların çözünürlük yeteneğinin arttığı üst HF bandında düşük hızlı nesnelere algılanması ve izlenmesi için denizden gelen 1. ve 2. derece Bragg saçılmasının bastırılması daha da önem kazanmaktadır.

Teknik yazında, Khan doğrusal öngörü modeline (*Linear Prediction Model*, LPC), Martin ve Khan tekil değer ayrıştırmasına (*Singular Value Decomposition*, SVD) dayanan kargaşa bastırma yöntemleri önermiştir [5]-[7]. Bu önerilerde, özellikle 1. derece Bragg hatlarının bastırılmasında başarılı sonuçlar alınmakta, ancak matris yoğun işlemlere gerek olmaktadır. Bu çalışmada, 1. ve 2. derece spektra bölgelerinin bastırılması için Fourier dönüşüm uzayında, Menzil-Doppler Frekans düzleminde çalışan yeni bir uyarlanırlı süzgeç (*adaptive filter*) yapısı önerilmektedir. Süzgecin, dik (*orthogonal*) dönüşüm nedeniyle hızlı yakınsama özelliğine sahip olması yanında, matris yoğun işlemlere gerek göstermediği için gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımı kolay ve uygundur. Süzgeç yapısında varolan dayanak sinyali süzgece girecek olan Menzil-Doppler çerçevesinden menzil ekseninde kayan Hamming penceresi yardımıyla elde edildiğinden ayrı bir referans kanalına da gereksinim yoktur. Doppler işaretinin durağanlık-dışı davranışı süzgeç tarafından izlenebilmektedir. Süzgecin başarımının sınanması için Barrick ve Lipa tarafından önerilen model nümerik çözümleme yöntemleri ile gerçekleştirilerek, üst HF bandı, kapalı denizler ve çeşitli oşinografik parametreler için belirli işaret-gürültü-oranlarında Doppler spektraları elde edilmiştir. Spektraların menzile bağlı yol kayıplarının hesaplanmasında "ITU-R Recommendation 368-7, *Ground-wave Propagation Curves*" temel alınmıştır. Doppler spektraları demet genişliği ve menzil çözünürlüğüne göre kalibre edilmiş, belirli radar kesit alanına sahip hedefler spektralara eklenmiştir. İkinci derece süre bölgelerinde ve Bragg rezonans frekansı üzerinde yer alan hedefler süzgeç çıkışında ayırt edilebilmektedir. Süzgeç bu yapısı ile bir ön-beyazlatma (*pre-whitening*) işlevi görmektedir.

<sup>1</sup> Bu çalışma Dz.K.K. 'lığı Araştırma Merkezi Komutanlığı (ARMERKOM) tarafından desteklenmiştir.



Şekil 1. Menzil-Doppler çerçevesine uygulanan uyarlanırlı süzgeç yapısı.

## 2. Dönüşüm Uzayı Tabanlı Uyarlanırlı Süzgeç

*Fourier* dönüşüm uzayı tabanlı uyarlanırlı süzgeç yapısı belirli bir tümleştirme zamanında radardan elde edilen menzil hücrelerine ilişkin verilere Şekil 1.'de görüldüğü gibi uygulanabilir. Tümleştirme zamanı boyunca elde edilen  $N$  nokta veri bloklarının hızlı *Fourier* dönüşümleri alındıktan sonra Menzil-Doppler çerçeveleri oluşturulur.  $D_k(m)$  ve  $X_k(m)$  sırasıyla,  $k$ 'nci frekans bileşenine ve  $m$ 'nci menzil hücrelerine ilişkin *Doppler* spektrası ve ilgili referans sinyali olsun; bu durumda uyarlanırlı süzgeç çıkışında elde edilecek sinyal bir hata sinyali olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$E_k(m) = D_k(m) - W_k(m)X_k(m), \quad k = 1, 2, \dots, N; \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

Burada,  $W_k(m)$   $k$ 'nci frekans bileşenine ilişkin karmaşık süzgeç katsayısıdır. Tümleştirme zamanı boyunca sinyalin durağan olduğu kabul edildiğinde frekans bileşenleri birbirlerine dik olacaktır. Bu durumda dönüşüm uzayı tabanlı uyarlanırlı süzgeç  $N$  adet tek ağırlığa sahip uyarlanırlı süzgeçten oluşacaktır. Referans sinyali süzgece giren Menzil-Doppler çerçevesinden menzil ekseninde kayan *Hamming* penceresi yardımıyla (2)'de verildiği gibi elde edilebilir:

$$X_k(m) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} H(l)D_k(m+l-(L-1)/2), \quad m = 1+(L-1)/2, \dots, M-(L-1)/2 \quad (2)$$

Burada,  $H(l)$  ayrıntılı *Hamming* pencere işlevini temsil etmektedir ve  $L$  daima tek sayıdır. Uyarlanırlı süzgecin katsayıları (3)'teki gibi güncellenebilir:

$$W_k(m+1) = W_k(m) + P_k(m)X_k^*(m)E_k(m) \quad (3)$$

$$P_k(m) = \left[ P_k^{-1}(m-1) + X_k(i)X_k^*(i) \right]^{-1} \approx \left[ \lambda^m P_k^{-1}(0) + \sum_{i=1}^m \lambda^{m-i} X_k^*(i)X_k(i) \right]^{-1} \quad (4)$$

Eşitlik (4) yakınsama oranını denetleyen değişken yakınsama katsayısını ifade etmektedir.  $P_k(0)$  başlangıç değeri olup genellikle 1'e eşit alınabilir.  $\lambda$ , ( $0 < \lambda < 1$ ) değerlerini alan "unutma faktörüdür." Yakınsama katsayısı giriş sinyal gücüne bağlı olduğu için süzgeçten hızlı yakınsama özelliği beklenir [8]. Eşitlik (1)'i (3)'de yerine koyarak ve (4) ifadesindeki eşitlik kullanılarak, ayrıca unutma faktörünü (4)'teki gibi işleme katarak süzgeç katsayıları (5)'de verildiği gibi ifade edilebilir:

$$W_k(m+1) = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda^{m-i} X_k^*(i)D_k(i)}{\lambda^m P_k^{-1}(0) + \sum_{i=1}^m \lambda^{m-i} X_k^*(i)X_k(i)} \quad (5)$$

Yeterince büyük  $m$  değerleri için  $P_k(0)$  değerinin bir etkisi kalmayacağından süzgeç, giriş sinyalindeki durağanlık-dışı değişimleri izleyebilir [8].  $W_k(0)=0$  alınmalıdır. Unutma faktörü  $\lambda$  işleme alınmadığında büyük  $m$  değerlerinde (5) eşitliği *Wiener* aktarım işlemine dönüşmektedir.

### 3. Simülasyon

Süzgecin başarımının sınanması için *Barrick* ve *Lipa* tarafından önerilen model [4]'de ayrıntılarıyla verildiği gibi geliştirilerek kapalı denizler için uygulanmış ve nümerik modelden Menzil-*Doppler* çerçeveleri elde edilmiştir. Çerçeveler, üst HF bandında 18 MHz taşıyıcı frekansında, deniz durumu 3 (rüzgar hızı = 6.5 m/s, dalga yüksekliği = 1.25m) ve deniz durumu 4 (rüzgar hızı = 9 m/s, dalga yüksekliği = 2.25m) için kabarma uzunluğu 200km, deniz derinliği 200m alınarak üretilmiştir. Rüzgar yönü radar bakış açısına dik alınmıştır. Buradaki oşinografik büyüklükler sakinlik dışı deniz durumlarına, ancak olağan tablolara karşılık gelmektedir. Nümerik model çıkışındaki birim alana normalize deniz radar kesit alanı 16 elemanlı doğrusal dizi anten demet genişliği ( $\approx 6^\circ$ ) ve tipik menzil çözünürlüğü (4 deniz-mili) temel alınarak ölçeklenmiştir. 20, 30, 60 ve 80km menzile dört nesne konmuş, sırasıyla 24dBm<sup>2</sup>, 25dBm<sup>2</sup>, 30dBm<sup>2</sup> ve 20dBm<sup>2</sup> RKA değerlerine sahip olacak şekilde ölçeklenerek Menzil-*Doppler* çerçevelerinde 1. ve 2. derece *Bragg* saçılma bölgelerinin içinde kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu noktalara karşılık gelen nesne hızları sırasıyla 28.3knot, 13.2knot, 22.3knot ve 5knot'dır.

Nümerik modelden elde edilen *Doppler* spektralleri "sonsuz ortalama" alınmış duruma karşılık gelen spektrallerdir [4]. Süzgeç uygulamasında, model çıkışındaki *Doppler* spektrallerine *Rayleigh* olasılık dağılımlı gürültü eklenerek 15 ve 20dB işaret-gürültü-oranı (İGO)'na sahip anlık *Doppler* spektralleri elde edilmiştir. İGO burada, nümerik model çıkışındaki spektral enerji ile eklenen gürültü enerjisinin birbirine oranı olarak tanımlanmıştır. Spektrallerin ve nesnelerin menzile bağlı zayıflamalarını Menzil-*Doppler* çerçevelerine katmak için yol kayıplarının hesaplanmasında "ITU-R Recommendation 368-7, Ground-wave Propagation Curves" dayanak alınmıştır.

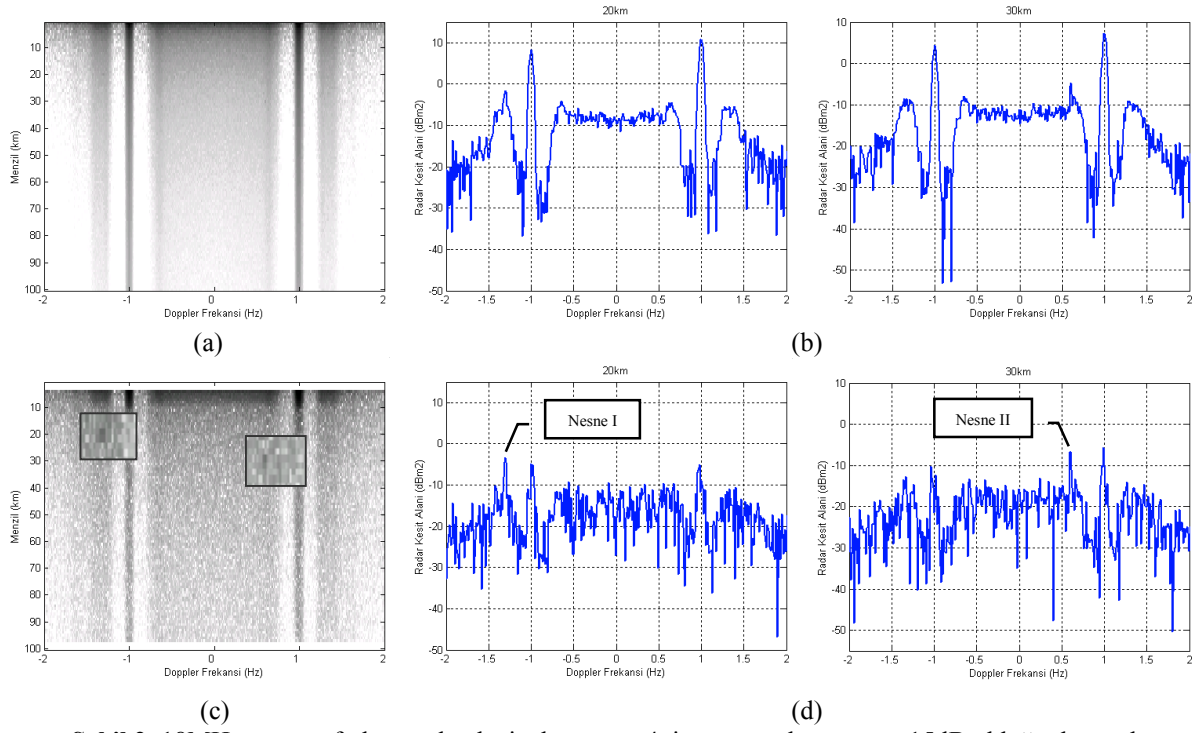
### 4. Sonuçlar

Simülasyon çalışmalarında uyarlanır süzgecin unutma faktörü  $\lambda$  ve referans sinyali pencere genişliği  $L$  'nin belirlenmesi için denemeler yapılmış, denemelerde bu iki büyüklük arasındaki ilişki göz önüne alınarak ilgili yol kaybında süzgecin yakınsama davranışı izlenerek en iyi değerlerin  $\lambda=0.18$ ,  $L=9$  olduğu saptanmıştır. Ölçülmüş gerçek sinyaller ile çalışılırken bu iki parametre menzil eksenini boyunca gözlenen sinyal değişimine göre eniyileştirilmelidir. Bu değerler ile Şekil 2. (c) ve Şekil 3. (c)'de süzgecin ilk 5-6 menzil hücresi geçildiğinde yakınsadığı gözlenmektedir. Şekil 2. (d)'de deniz durumu 4 ve İGO=15dB olduğu durumda 20 ve 30 km'deki iki nesnenin süzgeç çıkışında kolayca ayırt edilebildiği, 1. derece *Bragg* hatlarının 12-14dB, 2. derece sürey bölgelerinin 8-10dB bastırıldığı görülmektedir. Şekil 3. (d)'de ise deniz durumu 3 ve İGO=20dB olduğu durumda 60 ve 80km'deki iki nesnenin kolayca ayırt edildiği, 1. derece hatların 14-15dB, 2. derece bölgelerin 10dB bastırıldığı görülmektedir. 60km'deki nesne *Bragg* hattı içinde yer aldığı halde süzgeç çıkışında başarılı biçimde elde edilebilmektedir. Nesne RKA'larında 2dB yakınında düşük oranda azalma gözlenmiştir.

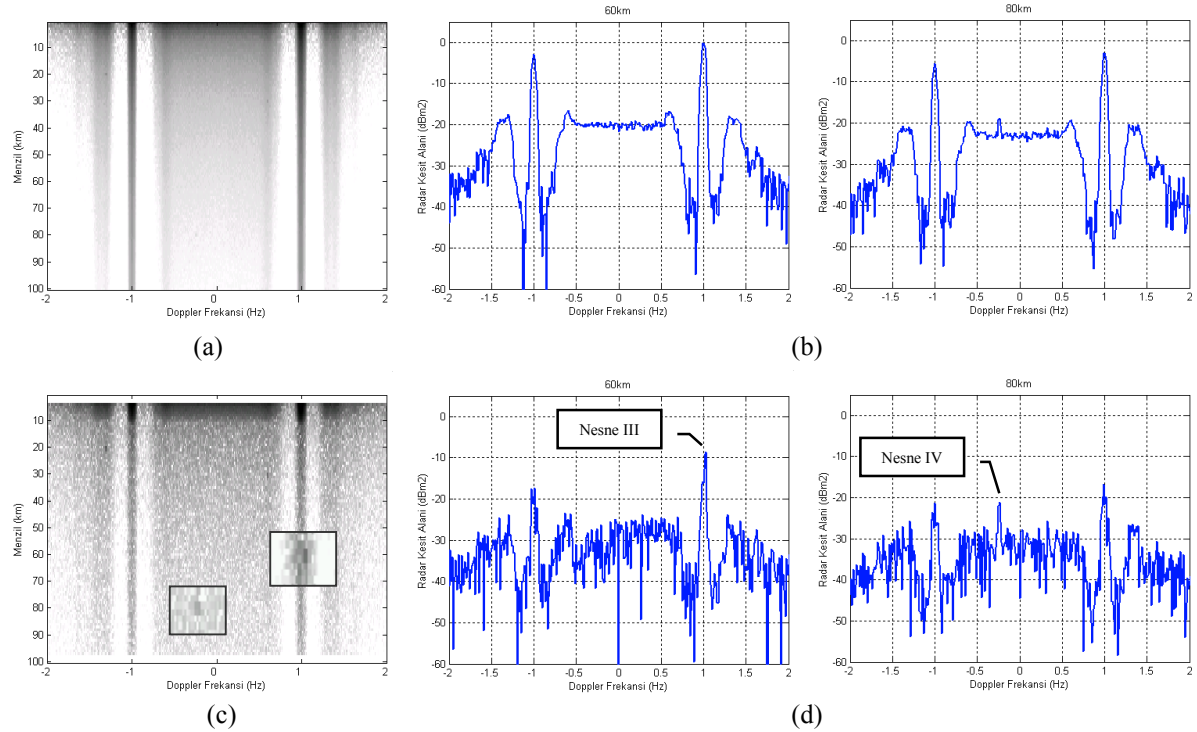
Simülasyon sonuçlardan görüldüğü gibi süzgeç her iki *Bragg* saçılma bölgesinde de iyi başarımla sergilemekte ve bu yapısı ile nesne algılamada bir ön-beyazlatma (*pre-whitening*) işlevi görmektedir. Simülasyon çalışmasının genelinden üst HF bandında çalışan SWHF radar ile düşük yansıtma özelliğine sahip nesnelerin algılanabileceğine ilişkin sonuçlar da çıkarılabilmektedir.

### Kaynaklar

- [1]. D.D. Crombie, "Doppler Spectrum of Sea Echo at 13.56 Mc/s," Nature, sf. 681-682, Nisan 1955.
- [2]. D.E. Barrick, "First-Order Theory and Analysis of MF/HF/VHF Scatter From The Sea", IEEE Trans. Antennas Propag., AP-20, sf. 2-10, 1972.
- [3]. D.E. Barrick, ve B.J. Lipa, "The Second Order Shallow Water Hydrodynamic Coupling Coefficient in Interpretation of HF Radar Sea Echo", IEEE J. of Oceanic Eng., OE-11, sf. 310-315, 1986.
- [4]. İ.B. Özge, Y. Bahadırlar, "Oşinografik Parametrelerin SWHF Radar *Doppler* İzgesine Etkisi," SİU-2002 10. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kur., Işık. Ün.v., Pamukkale/Denizli, sf. 1038-1043, 12-14 Haz. 2002.
- [5]. R.H. Khan, "Ocean-Clutter Model for High-Frequency Radar," IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 16, No.2, sf. 181-188, Nisan 1991.
- [6]. M.W.Y. Poon, R.H. Khan, S. Le-Ngoc, "A Singular Value Decomposition Based Method for Suppression Ocean Clutter in High Frequency Radar," IEEE Trans on SP, Vol.41, No.3, sf. 1421-1425, Mart 1993.
- [7]. R.H. Khan, D. Power, J. Walsh, "Ocean Clutter Suppression for an HF Ground Wave Radar," IEEE Canadian Conf. on Electrical and Computer Eng., Eng. Innov.: Voyage of Discovery, Vol.2, sf. 512-515, 1997.
- [8]. J.C. Ogue, T. Saito, Y. Hoshiko, "A Fast Convergence Frequency Domain Adaptive Filter," IEEE Trans. on ASSP, Vol.31, No.5, sf. 1312-1314, Ekim 1983.



**Şekil 2.** 18MHz taşıyıcı frekansında, deniz durumu = 4, işaret-gürültü-oranı = 15dB olduğu durumda (a) Menzil-Doppler çerçevesi, (b) 20 ve 30km menzildeki spektraller, (c) süzgeç çıkışındaki Menzil-Doppler çerçevesi, (d) 20 ve 30km menzildeki deniz-kargaşası bastırılmış spektraller. (Nesne-I RKA=24dBm<sup>2</sup>, Nesne-II RKA=25dBm<sup>2</sup>)



**Şekil 3.** 18MHz taşıyıcı frekansında, deniz durumu = 3, işaret-gürültü-oranı = 20dB olduğu durumda (a) Menzil-Doppler çerçevesi, (b) 60 ve 80km menzildeki spektraller, (c) süzgeç çıkışındaki Menzil-Doppler çerçevesi, (d) 60 ve 80km menzildeki deniz-kargaşası bastırılmış spektraller. (Nesne-III RKA=30dBm<sup>2</sup>, Nesne-IV RKA=20dBm<sup>2</sup>)