

# Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga (FMSD) Ölçüm Sistemlerinde Faz Gürültü Etkisinin Telafisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Eren VARDARLI, Kivılcım YÜKSEL ALDOĞAN\***

Mühendislik Fakültesi, Elektronik Müh. Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye  
(Geliş/Received : 14.09.2017 ; Kabul/Accepted :06.12.2017)

## ÖZ

Bu makalede, tüm tasarım parametreleri dikkate alınarak, Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga ölçüm sistemlerinde (FMSD) kullanılan faz gürültüsü telafi algoritmalarının analizi sunulmuştur. Bu sayede radyo frekansından optik frekanslara kadar FMSD-tabanlı sistemler için genel ve gerçekçi bir model oluşturulmuştur. Önerilen faz gürültüsü telafi algoritmasının geçerliliği benzetimler aracılığı ile doğrulanmıştır. Benzetim sonuçları makalede sunulan matematiksel modeller ile uyum içerisinde. Bu çalışma, doğrusal olmayan frekans modülasyonun ortaya çıkardığı pahalı ve karmaşık donanımsal gereksinimlerin üstesinden gelinmesini sağlayarak, birden fazla teknolojik alanda (örn. SAR radarlar, fiber optik sensörler) etki yaratabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Faz gürültüsü, frekans modülasyonlu sürekli dalga, metroloji, optik sensör, radar.

# Phase Noise Compensation in Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Measurement Systems

## ABSTRACT

We present the analysis of the phase noise compensation algorithms used in Frequency Modulated Continuous Wave measurement systems taking into account all the design parameters. This allows obtaining a generic yet realistic framework for the FMCW-based systems ranging from RF to optical frequencies. The efficiency of the proposed phase-noise compensation algorithm has been verified by the way of simulations. The simulation results show a good agreement with the mathematical foundations discussed in the paper. This work could have a technological implication in many fields (e.g. SAR radar, optical fiber sensor interrogation) in such a way that the stringent and expensive hardware requirements due to nonlinear frequency modulation effects can be overcome a posteriori by the phase noise compensation algorithm demonstrated in this article.

**Keywords:** Phase noise, frequency modulated continuous wave, metrology, optical sensor, radar.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga (FMSD) ölçüm teknikleri, başta radarlar olmak üzere, optik cihaz karakterizasyonu, fiber optik ağların izlenmesi, ve fiber optik sensör uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

FMSD ölçüm sistemlerinin, uzaysal çözünürlük, maksimum ölçüm mesafesi, sinyal algılama hassasiyeti gibi performans parametrelerini belirleyen en önemli etken, frekans modülasyonunun doğrusallığıdır. Doğrusallıktan uzaklaştıkça, elde edilen ara frekanslarda bozulma meydana geleceğinden hayalet hedef algılanması, birden çok hedefin birbirinden ayrıştırılamaması ve sinyal-gürültü oranının azalması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Doğrusal olmayan frekans modülasyonunun nedeni, frekans üretici osilatörlerin ideal olmayışı ve faz gürültüsüne sahip olmalarıdır.

Literatürdeki faz gürültüsü telafi yöntemleri donanımsal yöntemler ve işaret işleme yöntemleri olmak üzere iki grupta incelenebilir. Frekans tarama doğrusallığının

sağlanması için geliştirilen donanımsal çözümler, kullanılan frekans kaynağını iyileştirmeye yöneliktir. Bunlardan bazıları voltaj kontrollü osilatör için kapalı geri besleme döngüsü kullanılması [1] ya da frekansın tamamen dijital olarak sentezlenmesi ve frekans taramasının dijital olarak yapılmasıdır [2].

Donanımsal yöntemlere alternatif olarak sunulan yazılımsal çözümler ise, sayısal sinyal işleme tekniklerindeki gelişmeler sayesinde, son yılların yaygın araştırma konusu haline gelmiştir. Faz gürültü telafisi için kullanılan en yaygın yöntem, artıksal faz filtresi kullanılarak geliştirilmiş sinyal işleme algoritmasıdır [3, 4].

Bu makalede odaklandığımız çözüm yazılımsal olup, faz gürültüsünün neden olduğu bozulmayı sinyal işleme teknikleri kullanarak, ölçüm sonrası (*a posteriori*) gidermeyi amaçlamaktadır. Artıksal faz filtresini temel alan algoritmanın matematiksel olarak tanımlanmasının ardından, MATLAB benzetimleri yoluyla, faz gürültüsü telafi etkinliği çeşitli örneklerle gösterilmiştir. Makalede analiz edilen faz telafi algoritmasının, RF'den [3, 4] optik frekanslara [5-7] kadar uzanan geniş uygulama

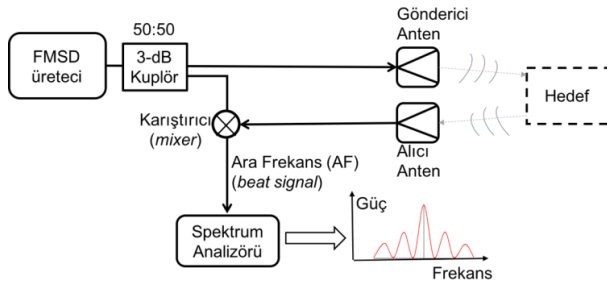
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : kivilcimyuksel@iyte.edu.tr

yelpazesindeki avantaj ve sınırlamaları gerçekçi sayısal verilerle tartışılmıştır. Bu çalışma ile, farklı uygulamalar alanlarında karşımıza çıkan FMSD faz gürültüsü telafi algoritmaları, tüm uygulamalarda geçerli olacak şekilde, ortak bir matematiksel çerçeveye alınarak literature katkı sağlanması hedeflenmiştir.

## 2. FMSD ÖLÇÜM SİSTEMLERİ ÇALIŞMA PRENSİBİ (OPERATION PRINCIPLE OF FMCW MEASUREMENT SYSTEMS)

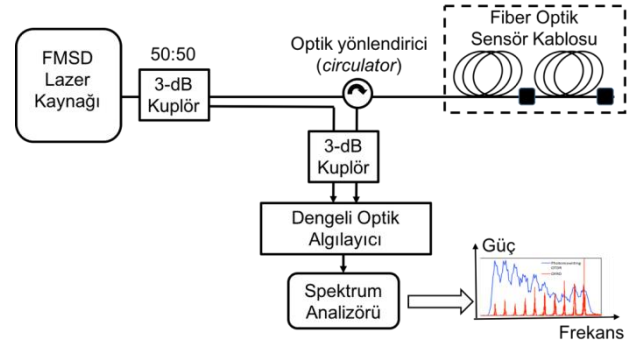
Radarlar genel olarak darbeli ve sürekli dalga radarlar olmak üzere iki grupta incelenebilir. Birinci grupta, gönderilen darbenin hedefe git-gel süresinden hedefin uzaklığı hesaplanır. Ancak bu radarlar yüksek hızlarda çalışan elektronik bileşenler ve karmaşık elektronik tasarım gerektirir. İkinci gruptaki radarlarda, hedefe gönderilen ve algılanan sürekli dalga aynı taşıyıcı frekansa sahiptir ve Doppler prensibi kullanılarak hareketli hedefin hızı hesaplanabilir. Fakat hedefin mesafe bilgisinin elde edilebilmesi için taşıyıcı frekansın modüle edilmesi, başka bir deyişle, gönderilen sürekli dalga sinyal ile hedeften yansıyan sinyal arasında frekans farkı olması gerekir. Bu amaçla, FMSD ölçüm yöntemi radarlara başarıyla uygulanmıştır [8].

Şekil 1’de bu tür bir radar uygulamasının basitleştirilmiş blok diagramı görülmektedir. FMSD üretici çıkışındaki sinyal gücü, 3 dB kuplör kullanılarak ikiye bölünür. Bu sinyalin yarısı referans sinyali (*Local Oscillator*) olarak karıştırıcıya aktarılırken, diğer yarısı gönderici antenden hedefe iletilir. Hedeften yansıyan sinyal, alıcı anten tarafından algılanır ve karıştırıcının radyo frekans girişine uygulanır. Karıştırıcının çıkışında elde edilen ara-frekans sinyali, spektrum analizörü ile incelenir ve hedefin uzaklığı ile doğru orantılı olan ara-frekans değeri frekans uzayında (sinc fonksiyonu olarak) gözlemlenir. FMSD tabanlı radarlar uzun mesafelerde yüksek çözünürlük sağlamanın yanı sıra hedefe gönderilen sinyalin gücü belli bir frekans aralığına dağıldığı için ‘dinlenmesi’ daha zor, dolayısıyla güvenlidir. Bu nedenle son yıllarda, kıyı güvenliği, insansız hava araçları ile kritik bölgelerin izlenmesi ve askeri uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [8].



**Şekil 1.** FMSD işaretin, radar alıcı/verici devresine uygulaması. FMSD: Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga. (Implementation of the FMCW signal as an input to the radar transceiver)

FMSD tabanlı ölçüm sistemlerinin, fiber optik sensör uygulamaları için şemalaştırılmış çalışma prensibi Şekil 2’de görülmektedir. FMSD lazer kaynağı çıkışındaki optik sinyalin gücü, 3 dB kuplör ile iki kola ayrılır. Test sinyali optik yönlendirici vasıtasıyla fiber optik kabloya yönlendirilir. Optik fiber içerisinde farklı mesafelerdeki sensör noktalarından yansıyan sinyal, yine optik yönlendirici ile ikinci bir kuplöre aktarılır. Burada, test ve referans sinyalleri girişime uğrar. İkinci kuplörün çıkış kollarına 180 derecelik faz farkı ile aktarılan girişim sinyalleri, dengeli fotodetektör üzerine düşürülerek hem sinyaldeki DC bileşen filtrelenir, hem de test ve referans sinyaller arasındaki faz farkı bilgisi elde edilir. Ardından, sadece ara-frekans bileşenlerini içeren sinyal, spektrum analizörü ile frekans uzayına aktarılır. Spektrum üzerinde gözlemlenen her bir ara-frekans bileşeni optik fiberdeki bir sensör noktasına karşılık gelmektedir. Böylece aynı fibere ardışıl olarak yerleştirilmiş sensörlerin mesafe ve genlik bilgileri, tek bir FMSD ölçümü ile sorgulanmış olur.



**Şekil 2.** FMSD işaretin, frekans bölgesinde optik yansımali sensör ölçüm sistemine uygulanması. (Implementation of the FMCW signal to the optical sensor interrogation system)

Yukarıda iki farklı uygulama alanı için açıklandığı üzere, spektrum analizörüne aktarılan girişim sinyali frekans uzayına aktarılır (frekans bileşenlerine ayrıştırılır). Her bir ara-frekans bileşeni, radar uygulamaları için hedefin uzaklık bilgisi, sensör uygulamalarında ise sensörün fiber içindeki pozisyon bilgisi ile doğrudan ilişkilidir. Hedef mesafesi, diğer sistem parametreleri cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$L = \frac{f_{AF} v T}{2 \Delta f} \quad (1)$$

burada  $f_{AF}$ , ölçülen ara-frekans bileşeni,  $v$ , FMSD işaretin ortamdaki hızı (örn. radar sinyalinin havadaki hızı, ışık sinyalinin optik fiberdeki hızı),  $T$  taşıyıcı frekans tarama periyodu,  $\Delta f$  ise taranan frekans aralığını temsil etmektedir. Eşitlik 1’deki  $\frac{1}{2}$  katsayısı, FMSD işaretinin, üretici ile hedef arasında gel-git özelliğinden kaynaklanır. Hesaplanabilecek en küçük frekans aralığı,  $T$  ile ters orantılı olduğu için uzaysal çözünürlük,

$$\Delta L = \frac{v}{2 \Delta f} \quad (2)$$

ifadesiyle hesaplanır. Eşitlik 2'den anlaşılacağı üzere, uzaysal çözünürlük sürekli dalganın frekansına bağlı olmayıp, taranan frekans aralığı ile ilişkilidir.

Girişte bahsedildiği üzere, FMSD tabanlı tüm ölçüm sistemlerinin performans parametreleri, direk veya dolaylı olarak, frekans modülasyonunun doğrusal (lineer) olmasına bağlıdır. Doğrusal olmayan frekans değişimi, Şekil 1 ve Şekil 2'de temsil edilen ara-frekanslar çevresinde bir genişlemeye, dolayısıyla uzaysal çözünürlük ve güç kaybına kayba neden olur. FMSD radarlarda karşılaşılan en önemli sorunlardan biri frekans tarayıcı osilatörlerin ideal olmayışı, başka bir deyişle faz gürültüsüne sahip olmalarıdır. FMSD tabanlı optik sistemlerde ise faz gürültüsü lazer kaynağının doğrusal olmayan frekans modülasyon cevabından kaynaklanır. Faz gürültüsünün matematiksel tanımı takip eden bölümde sunulmuştur.

### 3. FMSD ÖLÇÜM SİSTEMLERİ ANALİTİK MODELİ (ANALYTICAL MODEL OF FMCW MEASUREMENT SYSTEMS)

FMSD çıkışından hedefe gönderilen sinyalin ("giden sinyal") analitik ifadesi eşitlik 3'de verilmiştir. Buradaki üstel ifadenin argümanı giden sinyalin fazını ifade etmektedir.

$$u_{giden}(t) = a \left( \frac{t}{T} \right) \exp \left[ j2\pi \left( f_m t + \frac{1}{2} \gamma t^2 \right) \right] \quad (3)$$

bu eşitlikte  $a \left( \frac{t}{T} \right)$ , FMSD sinyal genliğinin  $T$  frekans tarama periyodu ile sınırlı zarfını,  $f_m$  giden sinyalin merkezi frekansını,  $\gamma$  taşıyıcı frekansın modülasyon hızını ( $\Delta f/T$ ) ifade etmektedir.

Hedefte yansıyıp algılayıcı birime ulaşan sinyal ("gelen sinyal"), giden sinyalin gel-git süresi ( $\tau$ ) kadar gecikmiş hali olarak gösterilebilir. ( $u_{gelen}(t) = u_{giden}(t - \tau)$ ).

Bu iki sinyal karıştırıcı vasıtasıyla çarpılarak ara frekans ( $f_{AF} = \gamma\tau$ ) değeri elde edilir. Bu işlem, tek bir hedef (veya tek bir sensör noktası) için, analitik olarak eşitlik 4 ve 5'de ifade edilmiştir.

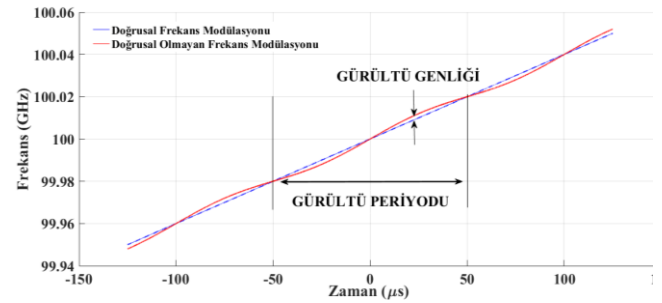
$$\cos \phi_{AF} = \cos \phi_{giden} - \phi_{gelen} \quad (4)$$

$$u_{AF}(t) = g(t) \exp \left[ j2\pi \left( f_m \tau + \gamma \tau t - \frac{1}{2} \gamma t^2 \right) \right] \quad (5)$$

$g(t)$ , algılanan sinyalin zarfı,  $\frac{1}{2} \gamma t^2$  hedef mesafesinden bağımsız bir faz terimi olarak eşitlik 5'te yer almaktadır. Önceki açıklamalardan anlaşılacağı gibi eşitlik 5, FMSD üreticinin doğrusal bir şekilde modülasyonu sonucu elde edilen ideal durumu temsil etmektedir. Faz gürültüsünü modelleyebilmek için bu ideal işlemin başlangıcında giden sinyalin fazına bir gürültü bileşeni eklenebilir. Faz gürültüsünün sinüzoidal olduğu durumda giden sinyalin frekansı eşitlik 6'da verilmiştir.

$$f(t)_{giden} = f_m + \gamma t + \beta_g \cos(2\pi f_g t) \quad (6)$$

bu eşitlikte gürültü frekansı  $f_g$ , gürültü genliği ise  $\beta_g$  olarak tanımlanmıştır (bakınız Şekil 3).



Şekil 3. Sinüzoidal olarak modellenmiş faz gürültüsü (Phase noise modelled as a pure sinusoidal)

Faz gürültüsünün sinüzoidal olduğu model temel alınarak ara frekans sinyalinin fazı eşitlik 7'de verilmiştir.

$$\phi_{AF}(t) = 2\pi \cdot \left[ f_m \cdot \tau + \gamma \cdot \tau \cdot t - \gamma \cdot \frac{\tau^2}{2} \right] + e(t) - e(t - \tau) \quad (7)$$

Bu eşitlikte  $e(t) = \frac{\beta_g}{f_g} \sin(2\pi f_g t)$  giden sinyalin faz gürültüsü,  $\frac{\beta_g}{f_g}$  modülasyon katsayısı,  $e(t - \tau)$  ise gelen sinyalin faz gürültüsüdür. Taylor açılımı kullanılarak gürültü teriminin nasıl bir modülasyona yol açtığı eşitlik 8'de belirtilmiştir.

$$s_e(t) = \exp \left[ j \cdot \frac{\beta_g}{f_g} \sin(2\pi \cdot f_g \cdot t) \right] = 1 + j \cdot \frac{\beta_g}{f_g} \sin(2\pi \cdot f_g \cdot t) - \frac{1}{2!} \left( \frac{\beta_g}{f_g} \right)^2 \sin^2(2\pi \cdot f_g \cdot t) - j \frac{1}{3!} \left( \frac{\beta_g}{f_g} \right)^3 \sin^3(2\pi \cdot f_g \cdot t) \quad (8)$$

Eşitlik 8 üzerinde yarım açı formülü<sup>1</sup> kullanılarak ikinci harmonik frekansının oluştuğu, bir diğer trigonometrik bağıntı<sup>2</sup> kullanılarak ise üçüncü harmonik frekansının oluştuğu gözlemlenebilir.

### 4. FAZ GÜRÜLTÜSÜ TELAFİ ALGORİTMASI (PHASE NOISE COMPENSATION ALGORITHM)

#### 4.1. Adım-1: Giden sinyalin faz gürültüsünden temizlenmesi

Algoritmanın ilk adımında,  $u_{AF}(t) = \exp(j \phi_{AF}(t))$  şeklinde ifade edilen kompleks ara frekans,  $e(t)$  faz gürültü bileşeninin eşleniği ile çarpılıp giden sinyalin faz gürültüsünden bağımsız hale gelmesi sağlanır. Bu işlem  $u_{AF1}(t) = u_{AF}(t) \cdot u_e^*(t)$  şeklinde ifade edilir.

Adım-1'in uygulanmasının ardından, istenmeyen faz terimi olarak  $\tau$  parametresine bağımlı terimler kalır. Bu bağımlılığın bir faz filtresi kullanılarak giderilmesi gerekmektedir. Bunun için algoritmanın ikinci adımında

<sup>1</sup>  $\sin^2(x) = \frac{1 - \cos(2x)}{2}$

<sup>2</sup>  $\cos^3(x) = \frac{3\cos(x) - \cos(3x)}{4}$

QPF (*Quadratic Phase Filter*) olarak bilinen ikincil dereceli faz filtresinden yararlanılmıştır.

#### 4.2. Adım-2: Faz filtresi uygulanması

Adım-1'in uygulanmasının ardından ara frekans sinyalinin fazı eşitlik 9 ile ifade edilir.

$$\phi(t)_{AF1} = 2\pi \cdot \left[ f_m \cdot \tau + \alpha \cdot \tau \cdot t - \alpha \cdot \frac{\tau^2}{2} \right] - e(t - \tau) \quad (9)$$

Bu adımdan sonra elimizde, gelen sinyalin faz gürültüsü ( $e(t - \tau)$ ) ve artıksal faz olarak bilinen terim ( $-\pi\alpha\tau^2$ ) kalmıştır. Bu terimlerin ikisi de gel-git süresine ( $\tau$ ) bağımlı olduğundan ilk adıma benzer bir işlem uygulamadan önce, bu bağımlılığın ikincil dereceli faz filtresi (QPF) ile ortadan kaldırılması gerekir. İkinci adımdaki işlem frekans alanında gerçekleşir. Bu işlem literatürde *tersine Fresnel dönüşümü* olarak bilinmektedir. Dönüşümün analitik ifadesi eşitlik 10 ve 11'de verilmiştir. Buradaki üstel ifade, faz filtresinin transfer fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

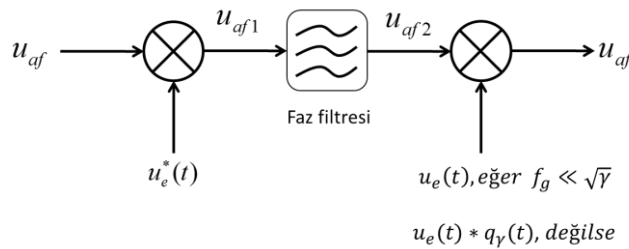
$$U_{AF2}(f) = U_{AF1}(f)Q_{-\gamma}(f) \quad (10)$$

$$Q_{-\gamma}(f) = \exp\left(j\pi \frac{f^2}{\gamma}\right) \quad (11)$$

#### 4.3. Adım-3:

Faz filtresinin uygulanmasının ardından elimizde saf bir sinüs dalgası ve buna ek olarak, gelen faz gürültü sinyalinin Fresnel dönüşümüne uğramış eşleniği [ $u_e(t) * q_\gamma(t)$ ]<sup>3</sup> kalmıştır. Artıksal faz temizlenmiş ve faz gürültüsü gel-git parametresinden bağımsız hale gelmiştir. Algoritmanın son adımında, elde edilen sinyal, eğer faz gürültü frekansı  $f_g \ll \sqrt{\gamma}$  ile ifade edilen dar-bant koşulunu sağlamakta ise  $u_e(t)$  ile, sağlamadığı takdirde ise  $u_e(t) * q_\gamma(t)$  ile çarpılır ve ideal girişim sinyali elde edilir.

Algoritmanın tüm adımları Şekil-4'de özetlenmiştir.

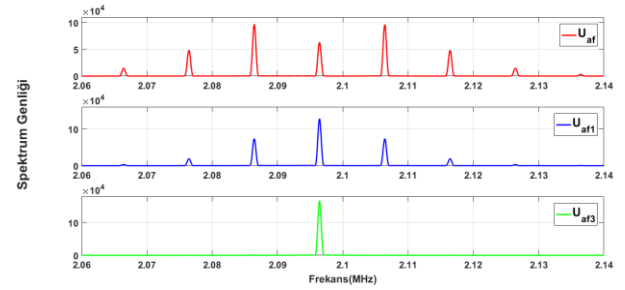


Şekil 4. Faz gürültü telafi algoritmanın genel yapısı (General structure of the phase noise compensation algorithm)

<sup>3</sup> \* sembolü konvolüsyon işlemini temsil etmektedir. Üstel \* sembolü ise eşlenik işlevindedir.

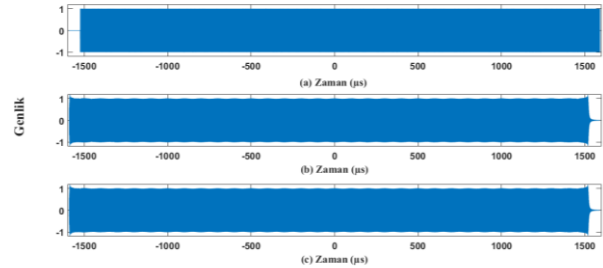
## 5. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

**5.1. Örnek-1:** bu örnekte, gürültü frekansı,  $f_g \ll \sqrt{\gamma}$  eşitsizliği ile ifade edilen dar-bant koşulunu sağlayacak şekilde seçilmiştir.  $\gamma$  frekans tarama parametresi olup, örneğimiz için 31.4 GHz/sn olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla gürültü frekansı 177 kHz'den çok daha düşük olmalıdır. Bizim belirlediğimiz frekans 10 kHz'dir. Algoritmanın uygulanmasının ardından elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5'de sunulmuştur. İlk olarak 10 kHz'lik faz gürültüsü ile modüle edilmiş ara frekans sinyali görülmektedir ( $u_{AF}$ ). Ardından algoritmanın birinci adımı sonrası ( $u_{AF1}$ ), ve üçüncü adımın ardından ( $u_{AF3}$ ) elde edilen saf ara-frekans sinüs spektrumu gözlenmektedir.



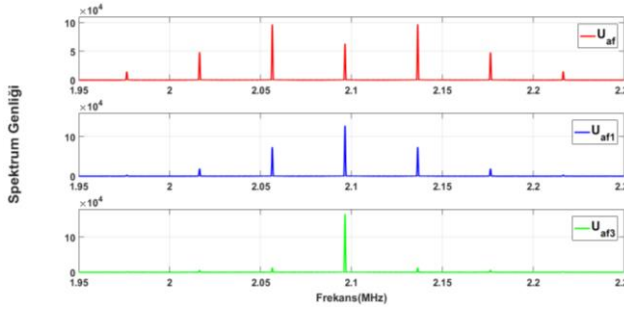
Şekil-5. Örnek-1 benzetim sonuçları (Example-1 simulation results)

İkinci adım, tümüyle geçirgen (*all-pass*) faz filtresinin uygulanmasını içerdiğinden sinyal genliğinde herhangi bir değişikliğe yol açmamaktadır (sinyalin sadece fazında değişiklik gerçekleşmektedir). Bu durum Şekil-6'da gösterilmektedir. Burada tarama periyodunun 3180  $\mu$ s olduğu ve  $u_{AF1}$  sinyalinin 66.6  $\mu$ s'lik gel-git süresinden dolayı gecikmeye maruz kaldığı görülmektedir. Çıktadaki sinyalin ise, uygulanan faz filtresi sayesinde, bu gecikme etkisinden bağımsız hale geldiği ve filtrenin işlevini başarıyla yerine getirdiği gözlemlenmektedir.



Şekil-6. (a) Faz filtresi girişi ( $u_{AF1}$ ) (b) Faz filtresi çıkışı ( $u_{AF2}$ ) (c) Adım-3 çıkışı ( $u_{AF3}$ ) (Input of phase filter, Output of phase filter, Output of step-3)

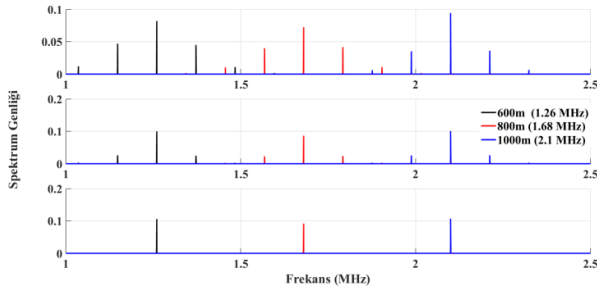
**5.2. Örnek-2:** Bu örnekte geniş-bant koşulunu sağlayacak şekilde seçilen gürültü frekansı kullanılmıştır. Bu frekans  $f_g \approx 0.2\sqrt{\gamma} \approx 40$  kHz ifadesiyle bulunur. Şekil 7’de sunulan benzetim sonuçlarında, 2.09 MHz merkez frekansının 40 kHz ile modüle edildiği açıkça görülebilmektedir. Bu modülasyon sonucunda ikinci ve üçüncü harmonikler oluşmuş, algoritmanın uygulanmasıyla bu harmonik bileşenleri (faz gürültüsü) bastırılmıştır.



Şekil-7. Örnek-2 benzetim sonuçları (Example-2 simulation results)

**5.3. Örnek-3:** Son örnek olarak benzetim algoritması optik frekans aralığında hem dar-bant, hem de geniş-bant koşulları için test edilmiştir. Merkez frekans olarak 193.54 THz alınmış ve 315 GHz/sn’lik bir frekans tarama hızıyla algoritma denenmiştir. Dar-bant ve geniş-bant koşullarını temsil etmek üzere sırasıyla 20 kHz ve 112 kHz’lik gürültü frekansları uygulanmıştır.

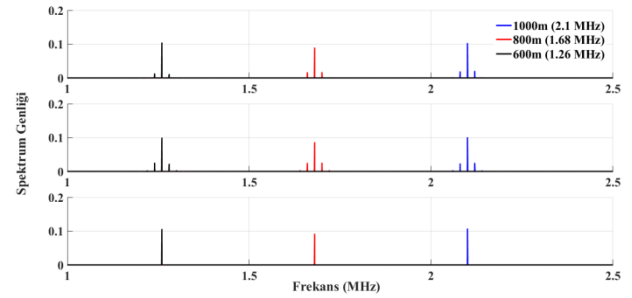
Şekil-8’de geniş-bant için uygulanan benzetim sonuçları görülmektedir. Fiberin 600, 800 ve 1000 metresinde oluşan üç farklı yansıma noktasının herbiri 112 kHz’lik faz gürültüsü ile modüle edilmiştir. Gel-git süreleriyle doğru orantılı olarak üç nokta için elde edilen ara frekanslar sırasıyla 1.26, 1.68 ve 2.1 MHz’dir. Algoritmanın son adımıyla birlikte, her bir noktanın ana gürültü frekansından ve harmoniklerinden temizlendiği gözlemlenmiştir.



Şekil-8. Örnek-3 geniş-bant benzetim sonuçları (Example-3 wide-band simulation results)

Şekil-9’da ise üç nokta için (600, 800 ve 1000 m) dar-bant koşulunu sağlayan 20 kHz’lik bir gürültü frekansı

eklenmiştir. Benzer şekilde algoritmanın son adımında ideal sinüs frekansına ulaşılmıştır.



Şekil-9. Örnek-3 dar-bant benzetim (Example-3 narrow-band simulation results)

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Literatürde farklı uygulama alanları için (örn. SAR radar, optik yansımali sorgulayıcılar) farklı terminoloji ve yaklaşımlarla incelenen algoritmalar, bu makale çalışması kapsamında, tüm uygulamalarda geçerli olacak şekilde tek bir temel çerçeveye alınmıştır. Dolayısıyla bu makalede elde edilen sonuçlar hem RF hem de optik temelli platformlarda kullanılabilir.

Çalışmada önerilen algoritma adımları, tüm matematiksel ayrıntıları ile incelendikten sonra, MATLAB benzetimleri yoluyla, çeşitli örnekler aracılığı ile doğrulanmıştır. Bu örneklerde algoritmanın elektromanyetik spektrumun geniş bir kısmında (1 GHz’den 193 THz’e) etkili olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte algoritmanın dar-bant ve geniş-bant (5 kHz’den 200 kHz’e) koşullarını içeren geniş bir gürültü frekansı (*side-lobe*) aralığında çalıştığı sonucu elde edilmiştir. Bu gürültü frekans aralığı aynı zamanda farklı modülasyon katsayıları (0.1’den 1’e) için denenmiş ve ana gürültü frekansının oluşturduğu harmonik frekansların etkin bir şekilde bastırıldığı gözlemlenmiştir.

Çalışmada önerilen yazılımsal yöntemin önemli bir avantajı, kullanılan algoritma parametrelerinin, farklı uygulama alanlarının ihtiyaçlarına göre uyarlanabilir olmasıdır. Benzetim örneklerinde gerçekçi rakamlarla gösterildiği üzere, FMSD sistemlerini kullanan radar uygulamaları için ihtiyaç duyulan uzaysal çözünürlük metreler mertebesindeyken, optik sensör sorgulayıcıları için bu değer birkaç milimetreye kadar inebilmektedir. Bu durumda, algoritma adımlarının doğru ve etkin çalışması için gereken parametreler (örnekleme frekansı, FFT uzunluğu, tarama başına düşen nokta sayısı vb.), istenen maksimum ölçüm mesafesi de hesaba katılarak, kolaylıkla değiştirilebilir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak makalede, pahalı ve karmaşık donanımsal değişikliklere gerek kalmadan, sinyal işleme yöntemleri ile faz gürültüsü sorununun

giderilmesi önerilerek literatüre katkı sağlanması hedeflenmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yongqi J., Guoyu H., Ding X., “A new realizable technique to improve the VCO linearity”, *6th International Symposium on antennas, propagation and EM theory*, 396-399, (2003).
- [2] Samarah A. S., Loffeld O., Shahab W., Al-Ibrahim M., “A Digital Sweep (Chirp) Generator With Extremely Small Memory Size And High Level Of The Spurious Free Dynamic Range”, *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 11(1): 9-15, 2010.
- [3] Meta A., Hoogeboom P., Ligthart L. P., “Range non-linearities correction in FMCW SAR”, *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 403 – 406, (2006).
- [4] Burgos G., Castillo M. C., et al, “Digital on-line compensation of errors induced by linear distortion in broadband LFM radars”, *Electronics Letters*, 39(1):116 – 118, (2003).
- [5] Ding Z., Liu T., Meng Z., Liu K., Chen Q., Du Y., Li D., Yao X. S., “Improving spatial resolution of optical frequency-domain reflectometry against frequency tuning nonlinearity using non-uniform fast Fourier transform”, *Review of Scientific Instruments*, 83(6): 066110, (2012).
- [6] Manuel R. M., Sutherland H. E., “Signal conditioning for compensating nonlinearity and non-repeatability of an optical frequency scanning laser implemented in a C-OFDR system”, *Applied Optics*, 56(3): 457-461, (2017).
- [7] Wang B., Fan X., Wang S., Du J., He Z., “Millimeter-resolution long-range OFDR using ultra-linearly 100 GHz-swept optical source realized by injection-locking technique and cascaded FWM process”, *Optics Express*, 25(4): 3514-3524, (2017).
- [8] <https://www.thalesgroup.com/en/squire>

**EK A: BENZETİM ORNEKLERİNDE KULLANILAN PARAMETRE ÇİZELGELARI**  
(ANNEX A: SIMULATION PARAMETERS USED IN THREE EXAMPLE CASES)

Benzetim parametresi	Sembol	Sayısal Değer	Birim
FFT uzunluğu	$N_{FFT}$	65536	Nokta sayısı
Pencere çeşidi	Hamming		
Örnekleme frekansı	$f_s$	100	MHz
Örnekleme Periyodu	$T_s$	10	ns
Her Bir Frekans Taraması için alınan nokta sayısı	$N_s$	25000	Nokta sayısı
Her Bir Frekans Taraması için işlenen nokta sayısı	$N_p$	18334	Nokta sayısı
RF merkez frekansı	$f_m$	100	GHz
RF dalgaboyu	$\lambda_m$	3	mm
Taranan frekans aralığı	$\Delta f$	100	MHz
Uzaysal çözünürlük	$\frac{c}{2\Delta f}$	1.5	m
Frekans tarama periyodu	$T$	3.18	ms
Frekans tarama frekansı	$1/T$	314	Hz
Frekans tarama hızı	$\gamma$	31.4	GHz/s
Maksimum ölçüm mesafesi	$L_{max}$	10	km
Maksimum gel-git zamanı	$\tau_{max}$	66.6	$\mu s$
Maksimum Ara-Frekans ( <i>beat</i> )	$f_{AF,max}$	2.09	MHz
Dar-bant gürültü frekansı	$f_g$	10	kHz
Geniş-bant gürültü frekansı	$f_g$	40	kHz

Çizelge 1. Benzetim parametreleri (Örnek-1 ve Örnek-2) (Simulation parameters for Example-1 and 2)

<b>Benzetim parametresi</b>	<b>Sembol</b>	<b>Sayısal Değer</b>	<b>Birim</b>
FFT uzunluğu	$N_{FFT}$	2,097,152	Nokta sayısı
Pencere çeşidi	Hamming		
Örnekleme frekansı	$f_s$	10	MHz
Örnekleme Periyodu	$T_s$	100	ns
Her Bir Frekans Taraması için alınan nokta sayısı	$N_S$	2,000,000	Nokta sayısı
Her Bir Frekans Taraması için işlenen nokta sayısı	$N_p$	1,999,934	Nokta sayısı
Optik merkez frekansı	$f_m$	193.54	THz
Optik dalgaboyu	$\lambda_m$	1550	nm
Taranan frekans aralığı	$\Delta f$	63	GHz
Uzaysal çözünürlük	$\frac{c}{2\Delta f}$	$\sim 2$	mm
Frekans tarama periyodu	$T$	200	ms
Frekans tarama frekansı	$1/T$	5	Hz
Frekans tarama hızı	$\gamma$	315	GHz/s
Maksimum ölçüm mesafesi	$L_{max}$	1	km
Maksimum gel-git zamanı	$\tau_{max}$	6.66	$\mu s$
Maksimum Ara-Frekans ( <i>beat</i> )	$f_{AF,max}$	2.1	MHz
Dar-bant gürültü frekansı	$f_g$	20	kHz
Geniş-bant gürültü frekansı	$f_g$	112	kHz