

Izgara Dışı Seyrek Kör Sensör Kalibrasyonu Off-Grid Sparse Blind Sensor Calibration

Sedat Çamlıca
Aselsan A.Ş.
Ankara, Türkiye
scamlıca@aselsan.com.tr

İmam Şamil Yetik
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
TOBB ETÜ
Ankara, Türkiye
syetik@etu.edu.tr

Orhan Arıkan
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Bilkent Üniversitesi
Ankara, Türkiye
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe —Sıkıştırılmış Algılama (SA) tabanlı teknikler genellikle sinyal uzayını ayrıklaştırarak bir ızgara üzerinde ifade ederler. Sinyalin sadece ızgara noktaları üzerinde ve seyrek olduğu varsayılır. Sürekli yapılarından dolayı sinyalleri bir ızgara üzerinde ifade etmek ızgara dışılık problemine sebep olur. Bunun yanında kalibrasyon da performans kaybına sebep olan bir diğer etkidir. Bu çalışmada, ızgara dışı çoklu sinyaller için SA'ya dayalı bir kör sensör kalibrasyon yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem ızgara dışı sinyal parametrelerini, genlik ve faz hatalarını aynı anda çözebilmektedir. Simülasyon çalışmaları yapılmış ve yorumlar verilmiştir. Hesaplanan metrikler ile alınan sonuçlar önerilen yöntemin daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler—Sıkıştırılmış Algılama, kör kalibrasyon, ızgara dışı.

Özet—Compressive Sensing (CS) based techniques generally discretize the signal space and assume that the signal is sparse and has support only on the discretized grid points. Due to continuous nature of the signals, representing the signal on a discretized grid results in the off-grid problem. Improper calibration is also another issue which can cause performance degradation. In this paper, a CS based blind calibration method is proposed for the multiple off-grid signal case. Proposed method is capable of estimating the off-grid signal parameters and correcting the gain and the phase errors simultaneously. Simulation analysis is performed and comments are drawn. Results show that the proposed method have superior performance in terms of the calculated metrics.

Keywords—Compressive Sensing, blind calibration, off-grid.

I. GİRİŞ

Seyrekliğe dayalı Sıkıştırılmış Algılama (SA) yöntemleri gerçek hayattaki uygulamalarda yaygın kullanım alanı bulması ile birlikte son dönemlerde oldukça önem kazanmıştır. Sıkıştırılmış Algılama Nyquist örnekleme oranı altında azaltılmış ölçüm ile çalışmaya olanak sağlamaktadır [1], [2]. SA'nın kullanıldığı uygulamalarda genellikle sinyaller örneklenerek belirli bir çözünürlüğe sahip bir ızgara üzerinde ifade edilir. Izgara yapısı, sinyaller sürekli olduğunda performans kaybına sebep olan ızgara dışılık problemine sebep olur. Performans kaybına sebep olabilecek bir başka konu ise kalibrasyon ihtiyacıdır. Kalibrasyon ile faz ve genlik hatalarının bozucu etkisinin giderilmesi amaçlanır.

Dağıtık sensör ya da radar ağlarında, sistemlerin konumları ve diğer bazı sistem parametrelerinin değerleri tam olarak bilinemez. Bu durum sensörlerde faz ve genlik bozulmalarına sebep olabilir [3], [4]. Örneğin, mikrofon dizilerinde de mikrofonların frekans yanıtlarındaki farklılıktan dolayı kalibrasyon ihtiyacı vardır [5].

Literatür incelendiğinde Kör Sensör Kalibrasyonu üzerine farklı çalışmaların olduğu görülmektedir. Çalışma [6]'da seyrekliğe dayalı konveks optimizasyon yöntemlerini kullanan kör sensör kalibrasyonu yöntemleri geliştirilmiştir. Sinyal geri çatımı ve kalibrasyon işlemi eş zamanlı olacak yapılmaktadır. Faz ve genlik kalibrasyonu işlemleri kör bir şekilde birlikte ya da ayrı yapılabilmektedir. Bir diğer makalede [3] olağan sensör ölçümleri kullanılarak sensör ağlarının kör kalibrasyonu yapılmaktadır. Bir diğer yayın olan [4]'de konumları bilinen yayın kaynakları kullanılarak sensör ağı kalibrasyonu yapılmaktadır. Ağdaki sensörlerin konumları, faz ve genlik bozulmalarının yanı sıra sensörler arası ortak eşleşme (mutual coupling) değerleri de belirlenmektedir. Makale [7]'de ölçülen sinyaller üzerindeki bilinmeyen genlik değerleri, genelleştirilmiş yaklaşık mesaj iletimi yöntemi ile kalibre edilmektedir. Çalışma [8]'da seyrekliğe dayalı bir eşlenik (conjugate) eğim algoritması ile kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Çalışma [9]'da sensör ağları üzerinden seyrekliğe dayalı toplam en küçük kareler yöntemi kullanılarak kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır. Diğer bir çalışmada [10] ise faz dizili sensörlerde seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu çalışılmıştır.

Literatür incelendiğinde seyrekliğe dayalı kör sensör kalibrasyonu probleminin çokça çalışıldığı görülmektedir. Faz ve genlik hatalarının ve sinyal geri-çatımının aynı anda yapıldığı yöntemler bulunmaktadır. Bununla birlikte var olan çalışmalarda ızgara dışı (off-grid) sinyalleri ele alarak kör sensör kalibrasyonu yapan bir yöntem yoktur. Bu özelliklere sahip özgün bir yöntemin geliştirilmesi önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada ise [11]'da tariflenen yöntemden yola çıkarak Dikey Eşleşme Arama [12] tabanlı ızgara dışılık altında kör sensör kalibrasyonu yapan yeni bir yöntem (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit, PC-OMP) önerilmiştir [13]. Bu yöntem ızgara dışı sinyalleri [11]'da tariflenen eğim (gradyen) arama tabanlı çözümle ele almaktadır. Ek olarak faz hatalarının yanında genlik hataları da kestirilmekte ve çoklu ölçüm ile kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır.

Bu çalışmada Dikey Eşleşme Arama [12] tabanlı ızgara dışılık altında kör sensör kalibrasyonu yapan yeni bir yön-

tem (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit, PC-OMP) geliştirilmiştir. Bu yöntem ızgara dışı sinyalleri eğim (gradyen) arama tabanlı çözümle ile ele almaktadır. Ek olarak faz hatalarının yanında genlik hataları da kestirilmekte ve çoklu ölçüm ile kör sensör kalibrasyonu yapılmaktadır.

II. SİNYAL MODELİ

Kör sensör kalibrasyonu için ızgara üzeri (on-grid) sinyal modeli aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 & \mathbf{y}_2 & \dots & \mathbf{y}_D \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi} \mathbf{G} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \dots & \mathbf{x}_D \end{bmatrix} + \mathbf{w}. \quad (1)$$

Burada D snapshot sayısıdır. \mathbf{x}_i ve \mathbf{y}_i sırasıyla geri çatılmak istenen sinyal ve buna karşılık gelen ölçüm vektörleridir. $\mathbf{\Psi}$ ölçüm matrisi olmak üzere, $\mathbf{G} = \mathbf{\Psi} \mathbf{A}$ olarak tanımlanır. \mathbf{w} ise sıfır ortalamalı toplamsal beyaz Gauss dağılıma sahip gürültü matrisini ifade eder. Ölçümler arası gürültünün bağımsız olduğu varsayılmıştır. Bu problemin örnek bir uygulaması olarak frekans spektrumu kestirimi verilebilir. Bu durumda \mathbf{A} matrisi uygun boyutlu bir ters DFT matrisi olur. L sensör sayısı olmak üzere her bir \mathbf{y}_i $L \times 1$ boyutludur. $\mathbf{\Phi}$ de-kalibrasyon matrisidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} d_1 e^{j\phi_1} & & & \\ & d_2 e^{j\phi_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & d_L e^{j\phi_L} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

burada d_j genlik kalibrasyon hatasını, ϕ_j ise faz kalibrasyonu hatasını ifade eder, $j = 1, 2, \dots, L$. Kör kalibrasyon işlemi sırasında bu parametreler kestirilerek kalibrasyon yapılması hedeflenmektedir.

Izgara dışılık ele alındığında \mathbf{y}_i aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{\Phi} \sum_{k=1}^K \alpha_{i,k} \mathbf{g}(f_{i,k}^o) + \mathbf{w}_i, \quad (3)$$

burada $\mathbf{g}(\cdot)$ sinyalin ifade edildiği eşlenik taban işlevidir ve $\mathbf{g}(f_k) = \mathbf{\Psi} \mathbf{a}(f_k)$ olarak tanımlanmıştır. $\alpha_{i,k}$ i . ölçüm için ilgili frekans spektrum bileşeninin genliğini ifade eder. $f_{i,k}^o$ ise i . ölçüm ve k . spektrum bileşeni için frekans değerini ifade eder ve ızgara dışılığı sebep olan parametredir.

Bu durumda bilinmeyen parametrelerin kestirimi için aşağıdaki optimizasyon problemi çözülür. Maliyet fonksiyonu olarak hataların kareleri toplamı kullanılmaktadır.

$$\min_{\alpha_{i,k}, f_{i,k}, \delta f_{i,k}, \phi_j, d_j} \sum_i \left\| \mathbf{y}_i - \mathbf{\Phi} \mathbf{\Psi} \sum_{k=1}^K \alpha_{i,k} \mathbf{a}(f_{i,k} + \delta f_{i,k}) \right\|_2^2,$$

$$\text{Öyle ki; } \sum_j d_j = c, |\delta f_k| < \Delta/2, \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, D \text{ ve } j = 1, 2, \dots, L.$$

Burada c pozitif bir sayıdır. Genlik kalibrasyonu için $\mathbf{y} = d\hat{\mathbf{y}}$ eşitliğini sağlayan sonsuz sayıda d ve $\hat{\mathbf{y}}$ çiftleri bulunabilir. Bu belirsizliği engellemek için genelliği bozmadan $\sum_j d_j = c$ kısıtı kullanılmıştır.

Denklem (4) ile verilen optimizasyon probleminde sinyal geriçatımı için $\alpha_{i,k}$, $f_{i,k}$ ve $\delta f_{i,k}$ bulunur. $f_{i,k}$ en yakın ızgara

noktası değerini, $\delta f_{i,k}$ ise ilgili pertürbasyon (sapma) miktarını ifade eder ve ızgara dışılığı sebep olan parametredir. Kör sensör kalibrasyonu işlemi içerisinde sinyal parametreleri $\alpha_{i,k}$ ve $f_{i,k}$, $\delta f_{i,k}$ ve kalibrasyon hataları ϕ_j , d_j iteratif bir şekilde kestirilecektir.

III. ÖNERİLEN YÖNTEM

Denklem (4) ile verilen optimizasyon problemi konveks değildir ve doğrudan çözülmesi oldukça zordur. Bu sebeple, kalibrasyon hatalarını ve ızgara dışı sinyal parametrelerini sırayla çözen yakın optimum (sub-optimal) aç gözlü bir yöntem geliştirilmiştir. Algoritmanın dış kabuğu Dikey Eşleşme Arama (Orthogonal Matching Pursuit - OMP) [12] tabanlıdır.

Öncelikle OMP kullanılarak ızgara noktaları üzerinde her α_l birbirinden bağımsız olarak bulunur. Bütün α_l 'ler hesaplandıktan sonra faz ve genlik düzeltmesi işlemi yapılır. Faz ve genlik düzeltmesi yapılan her bir $\hat{\mathbf{y}}_l$ ve α_l kullanılarak pertürbasyon yapılır. Izgara dışı taban vektörleri $\mathbf{g}(f_{1,i,k}^o, f_{2,i,k}^o)$ ve α_l 'ler bulunur. Tüm l 'ler için bulunan ızgara dışı değerler ile tekrar faz ve genlik düzeltmesi yapılır. Daha sonra algoritma başa döner ve bir durdurma kriteri sağlanana kadar iterasyona devam edilir.

Pertürbasyonların yapılması için k . iterasyonda, k adet ızgara noktası \mathbf{T}_k ve l . ölçüm $\mathbf{S}(\cdot)$ ile ifade edilen algoritmaya beslenir:

$$(\boldsymbol{\alpha}, [\delta f_1 \dots \delta f_k], \mathbf{\Phi}) = \mathbf{S}(\mathbf{y}, [f_1 \dots f_k]), \quad (5)$$

burada $\mathbf{S}(\cdot)$ ızgara dışı sinyal parametrelerini bulan çözücüdür. $\mathbf{S}(\cdot)$ 'in işleyişi aşağıda anlatılmaktadır.

Öncelikle genlik vektörü $\boldsymbol{\alpha}$ aşağıdaki gibi bulunur;

$$\alpha_l = \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}} \left\| \mathbf{y} - \sum_{p=1}^k \alpha_p \mathbf{g}(f_{p,l}) \right\|_2^2, \quad (6)$$

burada l , $\mathbf{S}(\cdot)$ döngü indisidir, $f_{p,l}$ ise l . iterasyondaki f_p vektörüdür. Daha sonra pertürbasyonlar gerçekleştirilir, $f_{p,l+1} = f_{p,l} + \delta f_{p,l}$. Burada $[\delta f_{1,l} \dots \delta f_{k,l}]$ aşağıdaki gibi bulunur;

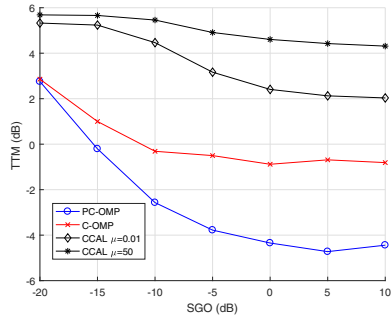
$$\min_{\delta f_{1,p}: |\delta f_{1,p}| \leq \Delta/2} \left\| \hat{\mathbf{y}} - \sum_{p=1}^k \alpha_{p,l} \mathbf{g}(f_{1,p,l} + \delta f_{1,p}) \right\|_2^2. \quad (7)$$

Denklem (6)'ın çözümü en küçük kareler yöntemi kullanılarak bulunur. Denklem (7) ise doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon problemidir. Bu problem gradyen düşümü ile çözülebilir. Bunun için (7) ile verilen maliyet fonksiyonu $f_{p,l}$ etrafında doğrusallaştırılabilir. $\mathbf{g}(f_{p,l} + \delta f_p)$ ifadesi birinci seviye Taylor serisine açılarak yakınsanabilir.

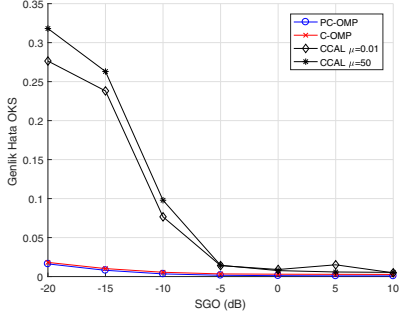
$$\mathbf{g}(f_{p,l} + \delta f_p) \approx \mathbf{g}(f_{p,l}) + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{p,l}} \delta f_p. \quad (8)$$

Denklem (8) kullanılırsa ve kısıtlar kaldırıldığında, (7) aşağıdaki gibi yazılabilir:

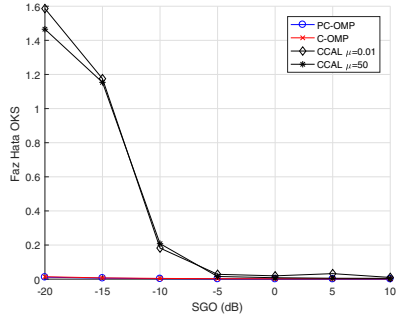
$$\begin{aligned} [\delta f_{1,l} \dots \delta f_{k,l}] &= \arg \min_{\mathbf{u}} \mathbf{J}_R(\mathbf{u}), \\ &= \arg \min_{\mathbf{u}} \left\| \mathbf{r}_l - \mathbf{B}_l \mathbf{u} \right\|_2^2, \end{aligned} \quad (9)$$



(a) TTM



(b) Genlik Hata OKS



(c) Faz Hata OKS (Radyan²)

Şekil 1. SGO'na göre Monte-Carlo Sonuçları. $SGO = [-20, 10]$. İzgara dışı durum için (a) TTM, (b) Genlik Hata OKS, (c) Faz Hata OKS.

burada $\mathbf{r}_l = \hat{\mathbf{y}} - \sum_{p=1}^k \alpha_{p,l} \mathbf{g}(f_{p,l})$ dik artıktır, ve $\mathbf{B}_l \in \mathbb{C}^{N \times k}$ ise doğrulaştırma noktasındaki ağırlıklandırılmış kısmi türevleri barındırır:

$$\mathbf{B}_l = \left[\Delta \alpha_{1,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{1,l}}, \dots, \Delta \alpha_{k,l} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial f_{k,l}} \right], \quad (10)$$

ve $\mathbf{u} = [\delta f_{1,1}, \dots, \delta f_{1,k}]^T \in \mathbb{R}^{k \times 1}$ l . döngüdeki güncellemeleri tutar. Her döngüde $f_{p,l}$ hesaplandığında \mathbf{B}_l de güncellenir. Döngüler sırasında arama negatif gradyen yönünde yapılır. Güncellenen parametreler bir ızgara hücresinde kalacak şekilde sınırlanır.

Denklem (9) ile verilen maliyet fonksiyonu için, J' 'nin $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ noktasındaki negatif gradyeni $-\nabla_{\mathbf{u}} J(\mathbf{u})|_{\mathbf{u}=\mathbf{0}} = \text{Re} \{2\mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l\}$ ile verilir. Denklem (7) ile verilen problemin

çözümü aşağıdaki gradyen düşümü döngüsü ile bulunur;

$$\begin{aligned} \alpha_l &= [\mathbf{g}(f_{1,l}) \mathbf{g}(f_{2,l}) \dots \mathbf{g}(f_{k,l})]^T \mathbf{y}, \\ f_{p,l+1} &= f_{p,l} + \mu_{p,l} \text{Re} \{ \mathbf{B}_l^H \mathbf{r}_l \}, \end{aligned} \quad (11)$$

burada $\mu_{p,l}$ yeterince küçük seçilmiş adım boyudur.

Faz hatası aşağıdaki gibi kestirilir;

$$\hat{\phi}_r = \angle \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r. \quad (12)$$

Burada \mathbf{y}_r ve $\hat{\mathbf{y}}_r$ sırasıyla r . sensör için ölçüm ve ölçüm kestirimini ifade eder.

Faz hatası kestirimi kullanılarak genlik hatası kestirimi aşağıdaki gibi bulunur;

$$\hat{d}_r = \frac{1}{2} \left(\frac{e^{j\hat{\phi}} \mathbf{y}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r + e^{-j\hat{\phi}} \hat{\mathbf{y}}_r^H \mathbf{y}_r}{\hat{\mathbf{y}}_r^H \hat{\mathbf{y}}_r} \right). \quad (13)$$

Genlik ve faz hatası ise $\hat{\mathbf{y}}_r = e^{-j\hat{\phi}_r} \mathbf{y}_r / \hat{d}_r$ şeklinde düzeltilir.

IV. BENZETİMLER

Bu bölümde önerilen yöntemin performansının değerlendirilmesi için benzetimler tasarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen İzgara Dışı Kör Kalibrasyon yöntemi (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit, PC-OMP), aynı algoritmayı kullanan ancak pertürbasyon yapmayan OMP (Calibration OMP, C-OMP) yöntemi ve bunların yanısıra Complete Calibration (CCAL) [6] yöntemi performans karşılaştırmalı benzetimlerde kullanılmıştır. Monte-Carlo çalışmaları yapılmış ve sonuçlar verilerek yorumlanmıştır.

Benzetimlerde her bir durum için 20 Monte-Carlo çalışması yapılmıştır. Alınan sonuçların ortalaması çizdirilmiştir. Gerçek ve geri-çatılan sinyaller arasındaki Toprak Taşıma Mesafesi (TTM) (Earth Mover's Distance, EMD) [14], faz hatası kestirimi Ortalama Karesel Hatası (OKS) ve genlik hatası kestiriminin ortalama karesel hatası hesaplanarak çizdirilmiştir. Genlik hatası kestirimi sırasında belirsizlik olabildiği için TTM hesaplanmadan önce her bir ölçüm kendisinin l_2 normu ile normalize edildikten sonra TTM hesaplanmıştır. Yine genlik hatası kestirimindeki belirsizlikten dolayı genlik hatası kestirimlerinin toplam değeri gerçek genlik hatasının toplam değerine eşitlendikten sonra genlik hatası OKS hesaplanmıştır.

A. Sinyal Gürültü Oranına göre Benzetim Sonuçları

Bu bölümde ızgara dışı sinyal durumunda farklı SGO değerlerindeki senaryolar için Monte-Carlo çalışmaları yapılmıştır. PC-OMP, C-OMP ve CCAL yöntemleri için metrikler hesaplanmış ve ortalamaları çizdirilmiştir. Sensör sayısı $N_y = 50$, ölçüm sayısı (snapshot sayısı) $L = 50$, frekans domeni sinyaller için ızgara boyutu (ayrık frekans domeninde sinyal boyutu) $N_x = 50$, seyreklik seviyesi $K = 3$ verilmiştir. Ortalama değeri 1 ve standart sapması 0.05 olan $N(1, 0.05)$ Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası $[0, 0.02\pi]$ arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir. CCAL yönteminin performansı ADMM parametresi μ değerine göre değişmektedir. Bu sebeple CCAL için iki farklı μ değerine göre sonuçlar hesaplanmıştır.

Alınan sonuçlar Şekil 1 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. CCAL için $\mu = 0.01$ değeri kullanıldığında alınan sonuçlar $\mu = 50$

değeri ile alınan sonuçlardan daha iyi çıkmaktadır. C-OMP'nin CCAL'dan daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. PC-OMP ise benzetimlerde kullanılan yöntemler arasında en iyi sonucu vermektedir.

PC-OMP ile C-OMP benzer algoritma akışına sahiptir. PC-OMP'de ek olarak parametre pertürbasyonu yapılarak ızgara dışı sinyal parametreleri kestirilmektedir. Sonuçların bu bilgi ile ele alınması PC-OMP'nin etkinliğini ortaya çıkarmaktadır.

Faz ve genlik hatası kestirimi sonuçlarında ise PC-OMP C-OMP'den daha iyi sonuç vermiştir. CCAL performansı en düşük yöntem olarak görülmektedir.

B. Kalibrasyon Hatasına göre Benzetim Sonuçları

Bu bölümde farklı genlik hatası standart sapma ve faz hatası değerlerine göre sonuçlar verilmiştir. $SGO = 30$ dB ve diğer senaryo parametreleri önceki bölümlerle aynı alınmıştır. genlik hatası analizi için ortalama değeri 10 ve standart sapması ilgili değer olan Gauss dağılımına göre rastgele değerler genlik hatası olarak verilmiştir. Faz hatası analizi için değerler $[0, \sigma\pi]$ arasında normal dağılımlı olarak verilmiştir, burada σ ilgili faz hatası senaryo parametresidir.

Genlik hatası için alınan sonuçlar Şekil 2 (a)'da verilmiştir. Sonuçların genlik hatası standart sapmasına göre yaklaşık değişmediği gözlemlenmektedir. PC-OMP en iyi değerleri vermektedir. Faz hatası için alınan sonuçlar Şekil 2 (b)'de verilmiştir. TTM sonuçlarında PC-OMP ve C-OMP sonuçları faz hatası de-kalibrasyon değerine göre artmaktadır. CCAL $\mu = 0.01$ parametre değerinde $\mu = 50$ değerini kullandığı durumdan daha iyi sonuç vermektedir. PC-OMP ve C-OMP yöntemleri ise CCAL'dan daha iyi sonuç vermekle birlikte, tüm faz hata değerlerinde PC-OMP en iyi sonuçlara sahiptir.

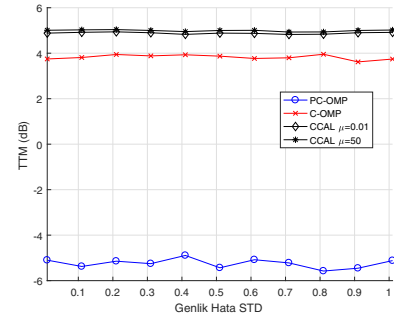
Faz ve genlik hatası kestirimi OKS performansları TTM sonuçlarına benzer çıkmaktadır. Ancak sayfa kısıtlamalarından dolayı sonuçlar burada verilememiştir.

V. SONUÇ

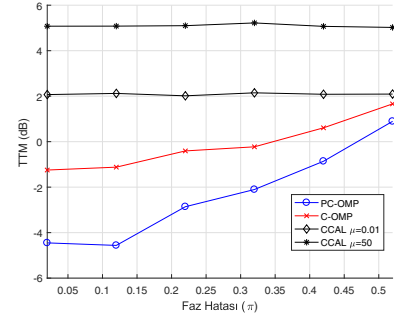
Bu çalışmada ızgara dışı sinyaller için Kör Sensör Kalibrasyonu problemi çalışılmıştır. PC-OMP (Perturbed Calibration Orthogonal Matching Pursuit) ızgara Dışı Seyrekliğe Dayalı Kör Sensör Kalibrasyonu yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, kör sensör kalibrasyonu için öncelikle çoklu ölçüm altında ızgara dışı sinyal parametreleri kestirilmektedir. Daha sonra faz ve genlik hatası kestirimi yapılmaktadır. Benzetimler incelendiğinde, literatürdeki yöntemlere kıyasla geliştirilen yöntemin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] D. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306, 2006.
- [2] E. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, pp. 489–509, 2006.
- [3] L. Balzano and R. Nowak, "Blind calibration of sensor networks," in *6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, April 2007.
- [4] B. C. Ng and C. M. S. See, "Sensor-array calibration using a maximum likelihood approach," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 44, pp. 827–835, June 1996.



(a) TTM - Genlik Hata



(b) TTM - Faz Hata

Şekil 2. Kalibrasyon hata değerlerine göre Monte-Carlo Sonuçları. (a) TTM - Genlik Hata STD: $[0, 1]$, (b) TTM - Faz Hatası: $[0, \pi]$.

- [5] R. Mignot, L. Daudet, and F. Ollivier, "Room reverberation reconstruction: Interpolation of the early part using compressed sensing," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 21, no. 11, pp. 2301–2312, Nov 2013.
- [6] C. Bilen, G. Puy, R. Gribonval, and L. Daudet, "Convex optimization approaches for blind sensor calibration using sparsity," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, pp. 4847–4856, September 2014.
- [7] U. Kamilov, A. Bourquard, E. Bostan, and M. Unser, "Autocalibrated signal reconstruction from linear measurements using adaptive gamp," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, October 2013.
- [8] H. Shen, M. Kleinstueber, C. Bilen, and R. Gribonval, "A conjugate gradient algorithm for blind sensor calibration in sparse recovery," in *IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing*, September 2013.
- [9] J. Lipor and L. Balzano, "Robust blind calibration via total least squares," in *IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2014.
- [10] S. Wijnholds and S. Chiarucci, "Blind calibration of phased arrays using sparsity constraints on the signal model," in *European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2016.
- [11] S. Camlica, A. C. Gurbuz, and O. Arikan, "Autofocused spotlight sar image reconstruction of off-grid sparse scenes," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, pp. 1880–1892, August 2017.
- [12] J. Tropp and A. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 12, pp. 4655–4666, Dec. 2007.
- [13] S. Camlica, *Seyreklik Tabanlı Sinyal Geriçatım ve Görüntüleme Yöntemlerinin Geliştirilmesi*. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Doktora Tezi, Ekim, 2017.
- [14] H. Ling and K. Okada, "An efficient earth mover's distance algorithm for robust histogram comparison," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Int.*, vol. 29, no. 5, pp. 840–853, May 2007.