

Vektör Sensör Dizinlerine Dayalı Yüksek Dereceli Akustik Algılayıcılar

Vector Sensor Array Based Higher Order Acoustic Sensors

M. Berke Gür
Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Bahçeşehir Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
{berke.gur}@bahcesehir.edu.tr

Özetçe—Akustik alanın uzamsal türevlerinden faydalanarak yüksek yönsellik performansları sağlayabilen algılayıcılar yüksek dereceli akustik algılayıcılar olarak nitelendirilmektedir. Bu bildiride, yüksek derecede akustik algılayıcılar oluşturmak için, akustik vektör sensör dizinlerine dayalı iki farklı yöntem tanıtılmaktadır. İlk yöntemde, sık yerleştirilmiş 2-B vektör sensörlerden oluşan kısa doğrusal dizinlerden faydalanılmaktadır. İkinci yöntemde ise, küçük dairesel bir dizin boyunca yapılan parçacık hızı ölçümlerinden yararlanılmaktadır. Her iki yöntem de frekanstan bağımsız ve yönlendirilebilir hüzmeye örüntüsüne sahip, oldukça küçük boyutlu dizinleri mümkün kılmaktadır. Önerilen yöntemlerin yönselliği gerçekçi ortam gürültüsü varsayımları altında elde edilmiştir. (Özet)

Anahtar Kelimeler — yüksek dereceli akustik algılayıcı; akustik vektör sensör; dizin hüzmeye oluşturma.

Abstract—Higher order acoustic sensors rely on the spatial gradients of the acoustic pressure field for achieving high directivity. Two practical methods for realizing higher order acoustic sensors using acoustic vector sensor arrays are presented. The first method relies on short linear arrays of closely spaced 2-D vector sensors. The second method is based on the particle velocity measurements obtained along a small circular aperture. Both methods are shown to result in very compact arrays with a steerable and frequency independent response. The directivity of the proposed methods is obtained under realistic ambient noise assumptions. (Abstract)

Keywords — higher order acoustic sensor; acoustic vector sensor; beamforming.

I. GİRİŞ

Son yıllarda önem kazanan sualtı ince çekili dizinler, hassas işleme cihazları ve uzamsal ses gibi uygulamalar, yüksek yönsellikte ve küçük boyutlu akustik sistemlere olan ihtiyacı arttırmıştır. Bu ölçütlere uygun akustik sistemlerden biri, akustik basınç alanı ve bu alanın uzamsal türevlerini ölçebilen yüksek dereceli akustik algılayıcılardır. Akustik basınç alan türevlerini doğrudan ölçebilen algılayıcılar bulunmaması sebebi ile yüksek dereceli akustik algılayıcılar farklı yöntemler

ile elde edilmektedir. Bu yöntemler arasında en yaygın olanı, kısa aralıklar ile doğrusal eş-yönlü akustik basınç algılayıcılarından oluşan dizinler kullanılmaktadır. Bu dizin boyunca yapılan ölçümlerin (geciktir-topla tipi konvansiyonel dizinlerin aksine) birbirlerinden çıkarılması sebebi ile çıkarmalı hüzmeye oluşturuçular olarak adlandırılmaktadır.[1-3]

Akustik basınç alanının birinci uzamsal türevi akustik parçacık ivmesi ile orantılıdır. Bu sebeple, parçacık hızını ölçebilen akustik vektör sensörlerden (AVS) oluşan dizinlerle de yüksek dereceli akustik algılayıcılar oluşturmak mümkün olmaktadır. Bu bildiride, yüksek dereceli akustik algılayıcıların oluşturulmasında kullanılan ve AVS'lere dayalı iki farklı dizin yapısı ve hüzmeye geliştirme yöntemi tanıtılmaktadır. Yöntemlerden ilki, kısa ve doğrusal AVS dizininde yapılan parçacık hızı ölçümlerinden sonlu fark yöntemi ile akustik alan türevlerinin çekilmesine dayalıdır.[4-5] İkinci yöntemde ise akustik alan türevleri, küçük bir dairesel AVS dizini üzerinde yapılan parçacık hızı ölçümlerinin uzamsal Fourier dönüşümü ile elde edilmektedir. Her iki yöntem sonucunda eşit hüzmeye yapısı ve yönsellikte yüksek dereceli akustik algılayıcılar elde edilmektedir. Bu bildiride, küçük boyutlu doğrusal ve dairesel AVS dizinleri ile elde edilen akustik algılayıcının hüzmeye yapısı ve yönsellik değerleri türetilmiştir.

II. AKUSTİK VEKTÖR SENSÖR DİZİNLERİ

Bu bölümde, akustik alanın uzamsal türevlerini çıkarmak için önerilen iki farklı geometrideki AVS dizini incelenmiştir: doğrusal ve dairesel geometriye sahip dizinler. Yazarın daha önceki bir çalışmasında, doğrusal AVS dizinlerinin teorisi detaylı bir şekilde açıklanmıştır.[4] Doğrusal ve dairesel dizinler arasındaki benzerliklerin vurgulanması için, burada doğrusal dizinlerde kullanılan yöntemin ana hatları tekrar edilmektedir. Her iki dizinin de boyutlarının dalga boyundan çok daha küçük olduğu varsayılmaktadır.

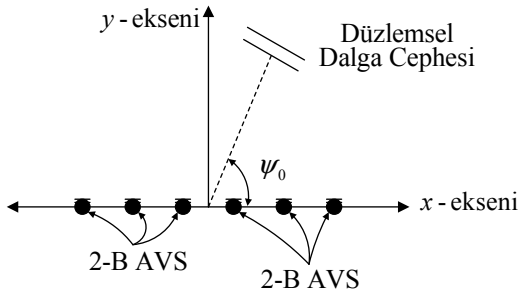
A. Doğrusal Dizinler

Bu bölümde, kısa doğrusal dizinler için daha önceki bir yayında önerilen hüzmeye oluşturma yönteminin bir özetine yer verilmektedir. Bu yöntemin detaylı açıklamasına referans [5]'te bulunabilir. Buna göre, eşit aralıklar ile yerleştirilmiş 2-B AVS'lerde oluşan doğrusal bir dizilim boyunca (dizilimin

Kartezyen koordinat sisteminde x -ekseni boyunca uzandığı varsayılmaktadır, Şekil 1) düzlemsel, zaman-harmonik dalgalardan kaynaklı 2-B akustik parçacık hızı alan değişkenleri

$$\begin{aligned} v_x(x) &= V \cos \psi_0 \cdot \exp(jk \cos \psi_0 x), \\ v_y(x) &= V \sin \psi_0 \cdot \exp(jk \cos \psi_0 x), \end{aligned} \quad (1)$$

denklemleri ile verilir [zaman değişkenini içeren $\exp(j\omega t)$ terimi ihmal edilmiştir]. Bu denklemlerde $j = \sqrt{-1}$, V parçacık hızı genliğini, ψ_0 akustik dalganın geliş (azimut) açısını, k dalga numarasını ifade etmektedir. Düzlemsel dalgalar için basınç ve parçacık hızı genlikleri arasında karakteristik empedans (Z) ile tanımlanan $P = Z \cdot V$ şeklinde bir doğrusal orantı vardır.



Şekil 1.6 AVS'den oluşan doğrusal dizinin koordinat eksenine göre konumu.

Akustik parçacık hızı türevlerinin dizinin merkezindeki değerlerini, dizin üzerindeki AVS'lerde yapılan ölçümlerden kestirimi için

$$g_n[v(0)] = \frac{\sum_{l=0}^n (-1)^{n-l} \binom{n}{l} v[(l-n/2)d]}{d^n} \quad (2)$$

sonlu fark operatörü kullanılmaktadır. Bu denklemde $v(0)$ akustik parçacık hızı değişkeninin $x=0$ koordinatındaki değerini, d ölçüm yapılan AVS'ler arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Denklem (2)'te yer alan iki terimli (binom) katsayıları,

$$\binom{n}{l} = \frac{n!}{l!(n-l)!} \quad (3)$$

eşitliği ile elde edilmektedir. AVS'ler arasındaki mesafenin dalga boyuna göre çok daha az olduğu durumlarda ($kd \ll 1$), n . dereceden sonlu fark operatörü $g_n(\cdot)$, akustik alan değişkenlerinin dizilimin merkezindeki n . dereceden uzaysal türevlerinin kestiriminde kullanılabilir (örneğin, $\partial^n v_x(0)/\partial x^n \approx g_n[v_x(0)]$).

Chebyshev polinomlarının özelliklerinden [6] faydalanılarak x -ekseni doğrultusundaki uzamsal türevler,

$$\frac{\partial^n}{\partial x^n} v_x(0) = V(jk)^n \cdot \begin{cases} C_{1,n} \cdot \cos[(n-2l+1)\psi_0], & n \text{ çift} \\ C_{2,n} \cdot \cos[(n-2l+1)\psi_0] + C_{3,n}, & n \text{ tek} \end{cases} \quad (4)$$

olarak hesaplanmaktadır. Denklem (4)'teki katsayılar

$$\begin{aligned} C_{1,n} &= \frac{2}{2^{n+1}} \sum_{l=0}^{n/2} \binom{n+1}{l}, & C_{2,n} &= \frac{2}{2^{n+1}} \sum_{l=0}^{(n-1)/2} \binom{n+1}{l}, \\ C_{3,n} &= \frac{1}{2^{n+1}} \binom{n+1}{(n+1)/2}, \end{aligned} \quad (5)$$

şeklinde elde edilir. y -ekseni doğrultusundaki uzamsal türevler ise,

$$\frac{\partial^n}{\partial x^n} v_y(0) = V(jk)^n \cdot \begin{cases} D_{1,n} \cdot \sin[(n-2l+1)\psi_0], & n \text{ çift} \\ D_{2,n} \cdot \sin[(n-2l+1)\psi_0], & n \text{ tek} \end{cases} \quad (6)$$

ifadelerine indirgenebilir. Denklem (6)'da yer alan katsayılar

$$\begin{aligned} D_{1,n} &= \frac{1}{2^n} \sum_{l=0}^{n/2} \left(\frac{n!(n-2l+1)}{l!(n-l+1)!} \right), \\ D_{2,n} &= \frac{1}{2^n} \sum_{l=0}^{(n-1)/2} \left(\frac{n!(n-2l+1)}{l!(n-l+1)!} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

olarak hesaplanmaktadır. Denklem (4)'te yer alan $\cos[(n-2l+1)\psi_0]$ ve denklem (6)'da yer alan $\sin[(n-2l+1)\psi_0]$ terimlerinin uzamsal türev derecesi ile artan yüksek yönsellik özellikleri bulunmaktadır.

Dizinin istenen istikamete yönlendirilmesini sağlayan dizin tepkisinin elde edilmesi için x - ve y -ekseni uzamsal türevlerine uygulanması gereken filtre katsayıları \mathbf{w}_x ve \mathbf{w}_y ,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_x \cdot \mathbf{w}_x &= \mathbf{b}_x, \\ \mathbf{A}_y \cdot \mathbf{w}_y &= \mathbf{b}_y, \end{aligned} \quad (8)$$

eşitliklerinden en küçük kareler yöntemi ile elde edilir. Denklem (8)'de \mathbf{A}_x matrisinin $a_x(l,n)$ katsayısı n . türevindeki $\cos(l\psi_0)$ teriminin katsayısına karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, \mathbf{A}_y matrisinin $a_y(l,n)$ katsayısı n . türevindeki $\sin(l\psi_0)$ teriminin katsayısına karşılık gelmektedir. Bu katsayılar denklem (4) ve denklem (6) kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem (8)'de yer alan \mathbf{b}_x ve \mathbf{b}_y vektörleri

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_x &= [\cos \psi_s \quad \cos 2\psi_s \quad \cdots \quad \cos[(N+1)\psi_s]]^T, \\ \mathbf{b}_y &= [\sin \psi_s \quad \sin 2\psi_s \quad \cdots \quad \sin[(N+1)\psi_s]]^T \end{aligned} \quad (9)$$

şeklinde tanımlanmaktadır ve dizilimin yönlendirilmesi istenen istikametinin azimut açısı (ψ_s) bilgisini içerir. Denklem (8) ve (9)'den doğrusal AVS dizinin tepkisi

$$r(\psi_s) = \sum_{n=0}^{N+1} \cos[n(\psi_0 - \psi_s)] \quad (10)$$

halini alır. Denklem (10)'da parçacık hızı genliği $V=1$ olarak kabul edilmiştir. Dizinin hüzmeye örüntüsü, dizinin tepki genliğinin karesi alınarak bulunur $B(\psi, \theta) = |r(\psi, \theta)|^2$.

B. Dairesel Dizinler

Bir daire boyunca eşit aralıklarla yerleştirilmiş iki boyutlu AVS'lerde oluşan r yarıçapındaki daireSEL dizin Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu dizinde her AVS, bulunduğu noktada Şekil 2'de gösterilen radyal (e_r) ve teğet (e_ψ) doğrultularında parçacık hızını ölçecek şekilde yerleştirilmiştir. Dairesel dizinin boyunca (r, ψ) küresel koordinatlarındaki herhangi bir noktadaki iki boyutlu akustik basınç alan değişkeni,

$$p(\psi) = P \cdot \exp[jkr \cos(\psi_0 - \psi)] \exp(j\omega t), \quad (11)$$

olarak ifade edilir. Denklem (11)'de verilen basınç alanının birinci tip Bessel fonksiyonları cinsinden açılımı,

$$p(\psi, t) = P \cdot \{J_0(kr) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} j^n J_n(kr) \cos[n(\psi_0 - \psi)]\} \exp(j\omega t) \quad (12)$$

şekindedir. Çok küçük boyutlu daireSEL dizinler ($0 < kr \ll \sqrt{n+1}$) için Bessel fonksiyonu

$$J_n(kr) \approx \frac{(kr/2)^n}{\Gamma(n+1)} \quad (13)$$

olarak yazılabilir. Akustik basınç ve parçacık hızı alanları arasında Euler denklemi

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\bar{\nabla} \cdot p \quad (14)$$

ile tanımlanan bir ilişki bulunmaktadır. Bu denklemde yer alan • skaler çarpımı gösterir, $\bar{\nabla}$ ise türev operatörüdür. 2-B akustik alan için türev operatörü küresel koordinatlarda

$$\bar{\nabla} = \frac{\partial}{\partial r} e_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \psi} e_\psi \quad (15)$$

olarak tanımlanır. Denklem (12)-(15) bir araya getirilmesi ile m . AVS'te ölçülen radyal ve teğet koordinatlarındaki parçacık hızları sırası ile

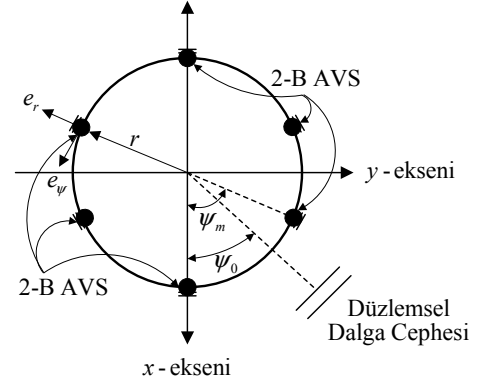
$$v_{r,m} = 2 \frac{V}{kr} \sum_{n=1}^{\infty} \{E_n \cos[n(\psi_0 - \psi_m)]\}, \quad (16)$$

$$v_{\psi,m} = 2 \frac{V}{kr} \sum_{n=1}^{\infty} \{E_n \sin[n(\psi_0 - \psi_m)]\},$$

olarak belirlenir. Denklem (16) kullanılan katsayılar

$$E_n = j^{n+1} \frac{n}{\Gamma(n+1)} (kr/2)^n \quad (17)$$

eşitliğinden bulunur. Denklem (16)'da dizindeki AVS'lerin azimut açılmal koordinatları $\psi_m = 2\pi m/M$, $m = 0, 1, \dots, M-1$ ile ifade edilir.



Şekil 2. 6 AVS'den oluşan daireSEL dizinin koordinat eksenine göre konumu.

Dairesel dizindeki ölçümlerden denklem (4) ve (6)'da verilenlere eşdeğer akustik modların elde edilmesi için

$$X(l) = \sum_{m=0}^{M-1} x_m \exp(-j2\pi ml/M), \quad l = 0, 1, \dots, M-1 \quad (18)$$

olarak tanımlanan uzamsal ayırık Fourier dönüşümü kullanılır. Bu dönüşümün denklem (16)'da verilen parçacık hızı ölçümlerine uygulanması sonucu sırası ile

$$V_r(l) = E_l \cos(l\psi_0), \quad l = 0, 1, \dots, M$$

$$V_\psi(l) = E_l \sin(l\psi_0), \quad l = 1, 2, \dots, M-1 \quad (19)$$

Fourier katsayıları ile ifade edilen akustik modlar elde edilir. Dairesel dizinin istenen istikamete yönlendirilmesi için, denklem (19)'de verilen radyal ve teğet akustik modlar E_l terimi ile normalize edildikten sonra sırası ile w_r ve w_ψ filtrelerinden geçirilir. Bu filtreler

$$w_r = [1 \quad \cos \psi_s \quad \dots \quad \cos(M\psi_s)]^T, \quad (20)$$

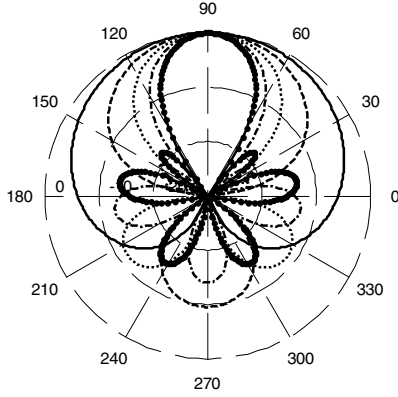
$$w_\psi = [\sin \psi_s \quad \sin 2\psi_s \quad \dots \quad \sin[(M-1)\psi_s]]^T,$$

olarak tanımlandığında, dizinin tepkisi doğrusal kısa dizinler için denklem (10)'da verilen tepkiye dönüşür.

III. PERFORMANS ANALİZİ VE SAYISAL BENZETİMLER

Bu bölümde küçük boyutlu doğrusal ve daireSEL dizinlerin sayısal benzetimler sonucu elde edilen yönsellik performansları açıklanmaktadır. Benzetimlerde, doğrusal dizinlerin 5 cm aralıkla yerleştirilen ve havada çalışan 6 AVS'ten oluştuğu varsayılmıştır. Dairesel dizinler ise havada çalışan ve 5 cm yarıçapındaki bir daire üzerine yerleştirilen 6 AVS'ten oluşmaktadır. Benzetimler 2-B ve 3-B eş-yönlü gürültü alanı varsayımı altında gerçekleştirilmiştir.

6 ve daha az AVS'ten oluşan kısa doğrusal ve küçük dairesel dizinlerin hüzme örüntüleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere, tek AVS'in hüzme örüntüsü, standart kardioid şeklindedir. Tek sayıda AVS'ten oluşan dizinlerde tam ön-arka ayrımı sağlanabilirken, çift AVS'li dizinlerde bu ayrım azalmaktadır. $M = 2$ algılayıcıdan oluşan dizinler için -10 dB ön-arka ayrım oranı elde edilir. AVS sayısı arttıkça bu ayrım oranı iyileşmektedir.



Şekil 3. 5. dereceye kadar yüksek dereceli akustik algılayıcıların hüzme örüntüsü.

N . dereceden bir akustik algılayıcının yönsellik fonksiyonu

$$D(\psi) = \frac{1}{2(N+2)} + \frac{\sin[(N+3/2)\psi]}{2(N+2)\sin(\psi/2)} \quad (21)$$

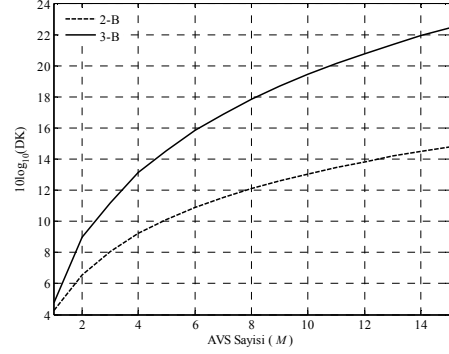
olarak hesaplanmıştır.[4],[5] Denklem (21)'de verilen yönsellik fonksiyonuna bağlı olarak oluşan yarım güç ana hüzme genişlik açısı $\psi_{-3\text{ dB}} = 155^\circ/M$ olarak hesaplanmıştır.

Dizin kazanımı (DK), dizinin tek bir eş-yönlü bir algılayıcıya göre sağladığı işaret-gürültü oranındaki iyileşme olarak tanımlanır. Dizinin tepki fonksiyonu $[r(\psi, \theta)]$ ve ortam gürültü şiddet endeksi ile belirlenir. Bu doğrultuda 2-B ve 3-B eş-yönsellikteki gürültü alanları için elde edilen dizin kazanımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4'te verilen yönsellik değerleri, AVS'ler arası mesafenin dalga boyuna kıyasla çok küçük olduğu varsayımı ile çıkarılmıştır. Belli bir algılayıcı arası mesafe için frekans arttıkça bu varsayım geçersiz hale gelmeye ve dizinin yönsellik değerleri bozulmaya başlamaktadır. Bu durum, dizin kazanımının frekansa göre değişimini gösteren Şekil 5'te açıkça ortaya çıkmaktadır. Bu şekilden de görüleceği üzere, özellikle düşük frekanslarda dizinin yönselliği frekansla çok fazla değişmemektedir.

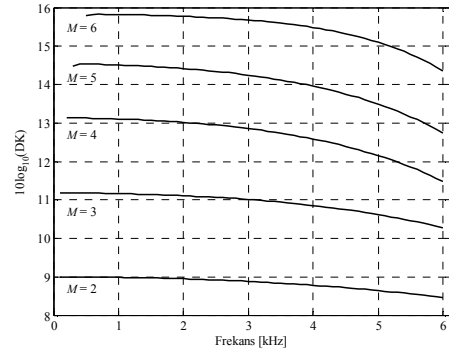
IV. SONUÇLAR

Bu bildiriye, yüksek dereceli akustik algılayıcıların elde edilmesi için önerilen ve AVS dizinlerine dayalı iki yöntem tanıtılmıştır. İlk yöntem doğrusal kısa AVS dizinlerine, ikincisi ise küçük dairesel AVS dizinlerine dayalıdır. Her iki yöntemde de, kullanılan dizin geometrisinin özelliklerinden faydalanılarak akustik alanının yüksek yönselliğe sahip modları çıkarılmıştır. Önerilen yöntemler, diferansiyel mikrofon ve

çıkarımlı dizinlerden farklı olarak istenen yöne, hüzme yapılarında ve yönselliklerinde bozulma olmadan yönlendirilebilmektedir. Bu dizinlerin tepkisi, geniş bir frekans bandında bozulmadan aynı kalmaktadır. Dairesel dizinler alçak frekanslarda, doğrusal dizinler ise daha yüksek frekanslarda kullanıma uygundur. Benzetimler sonucu dizinlerin 10 dB veya daha iyi ön-arka ayrımı sağlayabildiği tespit edilmiştir.



Şekil 4. 2-B ve 3-B eş-yönsellikteki gürültü alanlarında dizin kazanımının (DK) dizindeki AVS sayısına göre değişimi.



Şekil 5. Değişik sayıda AVS'ten oluşan dizinlerin dizin kazanımlarının frekansa bağlı değişimi.

KAYNAKÇA

- [1] Olson, H. F., "Gradient microphones", J. Acoust. Soc. Amer., 17(3): 192-198, 1946.
- [2] Elko, G. W., "Differential microphone arrays", Audio Signal Processing for Next-Generation Multimedia Communication Systems, edited by Y. Huang and J. Benesty (Kluwer, New York) pp. 11-65, 2004.
- [3] De Sena, E., Hacıhabiboğlu, H., Cvetkovic, Z. "On the design and implementation of higher order differential microphones", IEEE Trans. Speech and Audio Proc., 20(1):162-174, 2012.
- [4] Gür, M. B. "Doğrusal vektör algılayıcı dizinler için partikül hızı gradyanına dayalı akustik mod hüzme oluşturucu", 21. SIU Konf., 2013, p 1-4.
- [5] Gür, B. M. "Gradient based processing for linear vector sensor arrays", POMA 17(1), 070084, 2013.
- [6] Hochstrasser, U. W. "Orthogonal polynomials", Handbook of Mathematics Functions, 9th ed., edited by M. Abramowitz and I. A. Stegun (Dover, New York), pp. 773-802, 1972.