

Правоъгълна еквилистантна smart антена с изотропни елементи – методи за адаптивно формиране на лъча, компенсиране на взаимното влияние

Вяра Василева, Сава Савов и Мирослава Донева

Uniform Rectangular Smart Antenna with Omnidirectional Elements – ABF Methods, Mutual Coupling Compensation: *In this paper, the adaptive beamforming (ABF) estimation principles of uniform rectangular array (URA) are introduced. The URA is composed of a number of uniformly distributed identical omnidirectional antenna elements. A LMS algorithm is applied to antenna beamforming in URA. The effect of mutual coupling between array elements on the performance of smart antenna is investigated. The ABF method produced incorrect results unless is it taken into consideration.*

Key words: *adaptive array, direction of arrival, smart antenna, uniform rectangular array*

ВЪВЕДЕНИЕ

Smart антените се развиват с високи темпове и стават популярни през последните години. Операторите на безжични услуги търсят нови нехнологии, които да се използват за цел подобряване капацитета на системата, по-високо качество и предоставяне на нови услуги [1]. Основната идея при smart антените е обработка на процеси в пространството. Адаптивни решетки с подходяща конфигурация, разположени при базовата станция могат да осигурят значително по-голям капацитет на радиокомуникационната система при наличните ограничения за използване на честотния обхват. Проучването и изследването на smart антени, подходящи за безжични комуникационни системи обхваща: линейни еквилистантни решетки (ЛЕР) и правоъгълни еквилистантни решетки (ПЕР). ЛЕР не притежават способността да сканират в 3-D пространството, което е необходимост – безжичните устройства да сканират главния лъч в направление на елевация - θ и азимут - ϕ . По тази причина, ПЕР са по-подходящи при мобилните комуникации.

Съществуват различни методи за оценяване на адаптивното формиране на лъча (АФЛ). Един от най-популярните сред тях е методът LMS (Least Mean Squares) [2], [3]. При АФЛ много често се приема, че елементите на smart антената са изолирани един от друг. Във връзка с получаване на оценка с висока точност за работата на системата, е отчетено взаимното влияние (ВВ) между излъчвателите, съществуващо в реалните антенни решетки [4].

ПРАВОЪГЪЛНА ЕКВИЛИСТАНТНА РЕШЕТКА

Структура на решетката: Правоъгълна еквилистантна решетка от $N \times M$ равномерно разпределени еднакви изотропни антенни елемента, където M и N са четни числа (Фиг. 1), е разположена симетрично относно равнината $x-y$.

Приемаме, че теснолентов сигнал (плоска вълна с дължина на вълната λ) попада на решетката от направление θ, ϕ . Началото на декартовата координатна система съвпада с центъра на решетката.

Както е показано на Фиг. 1, факторът на ПЕР (AF) с максимум в направление θ_0, ϕ_0 е [1]

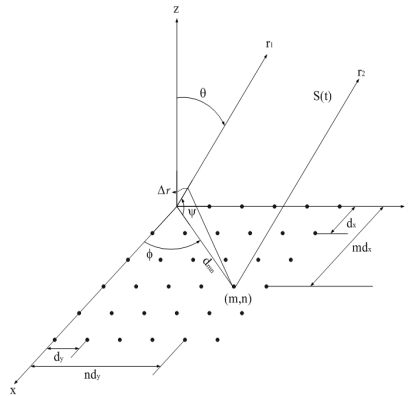
$$[AF(\theta, \phi)]_{M \times N} = 4 \sum_{m=1}^{M/2} \sum_{n=1}^{N/2} A_{mn} \cos[(2m-1)u] \cos[(2n-1)v] \quad (1)$$

където

$$u = \frac{\pi d_x}{\lambda} (\sin \theta \cos \phi - \sin \theta_0 \cos \phi_0) \quad (2)$$

$$v = \frac{\pi d_y}{\lambda} (\sin \theta \sin \phi - \sin \theta_0 \sin \phi_0) \quad (3)$$

където A_{mn} е амплитуда на възбуждане на отделния елемент, d_x и d_y са разстоянията между елементите по x-ос и y-ос, съответно.

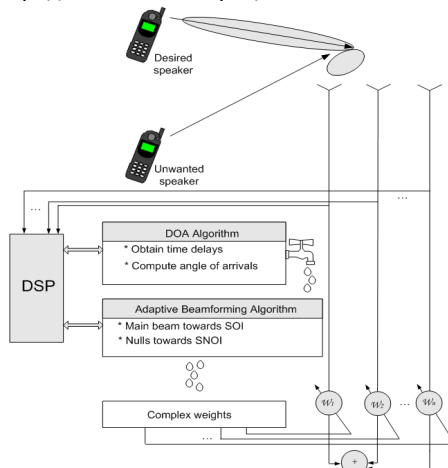


Фигура 1. Геометрия на $(N \times M)$ – елементна ПЕР и посока на падащата плоска вълна.

Оценяване на адаптивното формиране на лъча: два класа алгоритми са представени в литературата [5]:

1) Адаптивни алгоритми, базирани на информация за посоката на пристигане на лъча, която се обработва, за да се постигне идеална насоченост на максимум излъчване на диаграмата на антената по направление на полезния сигнал и да се определи мястото на нулите към нежеланите сигнали (Фиг. 2).

2) Алгоритми, използващи еталонен сигнал за корекция на величините и фазите на теглата и намаляване на закъсненията във времето, създадени от попадащите на решетката сигнали. Тук се разглежда един от най-популярните от този клас методи, приложим за ПЕР: LMS алгоритъм. Методът използва предходните модели на теглата при оценка на градиента в $n^{\text{та}}$ итерация.



Фигура 2. Блок – схема на smart антена.

LMS алгоритъмът е един от най-простите методи за оценяване на оптималните тегла на антенната решетка на база използване на еталонен сигнал. Той прилага

оценител на градиента вместо действителната стойност на градиента, тъй като нейното изчисление е невъзможно, поради необходимост от точно познаване на пристигащите сигнали.

Оптималните тегла се определят като [6]

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu g(\mathbf{w}(n)) \quad (4)$$

където $\mathbf{w}(n+1)$ е вектор на теглата, изчислени при $(n+1)^{\text{та}}$ итерация, μ е размер на стъпката, свързан със степента на приближение; сигналът на изхода на решетката е

$$y(\mathbf{w}(n)) = \mathbf{w}^H(n) \mathbf{x}(n+1) \quad (5)$$

където $\mathbf{x}(n+1)$ е вектор на сигнала на решетката, изчислен при $(n+1)^{\text{та}}$ итерация и $y(\mathbf{w}(n))$ е изходният сигнал.

Методът в класическата си форма използва оценка на градиента и корелация между сигналите на решетката и еталонния сигнал r , изчислени при $(n+1)^{\text{та}}$ итерация

$$\mathbf{g}(\mathbf{w}(n)) = 2\mathbf{x}(n+1)\mathbf{x}^H(n+1)\mathbf{w}(n) - 2\mathbf{x}(n+1)r^*(n+1) \quad (6)$$

където \mathbf{g} вектор на градиента.

Грешката между сигнала на изхода на решетката и еталонния сигнал е [7]

$$\varepsilon(\mathbf{w}(n)) = r(n+1) - \mathbf{w}^H(n)\mathbf{x}(n+1) \quad (7)$$

и

$$\mathbf{g}(\mathbf{w}(n)) = -2\mathbf{x}(n+1)\varepsilon^*(\mathbf{w}(n)) \quad (8)$$

е изчисления градиент като произведение от грешката $\varepsilon(\mathbf{w}(n))$ и сигналите след $n^{\text{та}}$ итерация.

Този алгоритъм има следните предимства: безпристрастна и точна оценка на градиента, ниска изчислителна сложност. Главният недостатък на LMS метод е ниската скорост на сходимост.

Компенсирание на взаимното влияние: Взаимното влияние между елементите играе важна роля за прецизната работа на smart антената. Методите за оценяване на адаптивното формиране на лъча дават некоректни резултати, когато взаимното влияние не е отчетено.

Методът за компенсиране на този ефект е следният: новите тегла се избират на база на матричното уравнение

$$\mathbf{w}_{\text{comp}} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{w} \quad (9)$$

където \mathbf{C} е матрицата на взаимно влияние, определена чрез

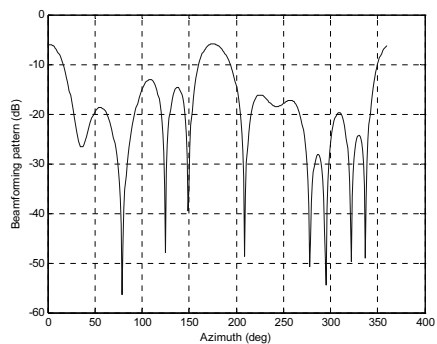
$$\mathbf{C} = \mathbf{I} + \mathbf{Z}\mathbf{Z}_L^{-1} \quad (10)$$

където \mathbf{Z}_L – товарен импеданс на всеки елемент, \mathbf{I} – единична матрица, \mathbf{Z} – матрица с диагонални елементи собствените импеданси, а извън диагонала – елементите са взаимните импеданси. При анализа, тези елементи могат лесно да се изчислят, използвайки средата на Matlab.

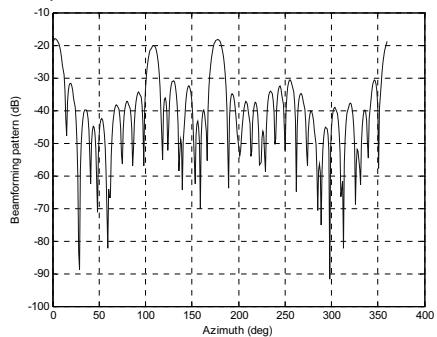
РЕЗУЛТАТИ ОТ СИМУЛАЦИЯ

LMS алгоритъмът дава прецизни резултати при адаптивно формиране на диаграмата на насоченост (beamforming pattern) на решетката. За илюстрация на приложимостта на този метод към ПЕР, разглеждаме два случая: а) ПЕР с $N=6$ и $M=6$ елементи и разстояние между тях $d_x = d_y = 0.5\lambda$; б) ПЕР с $N=10$ и $M=10$ елементи и разстояние между тях $d_x = d_y = 0.5\lambda$. Резултатите от симулациите са показани на Фиг. 3 и Фиг. 4, съответно. ПЕР е изследвана при следната постановка: направление на полезния сигнал $\theta = 20^\circ$, $\phi = 170^\circ$ при наличие на смушаващ сигнал от направление $\theta = 40^\circ$, $\phi = 150^\circ$ и адитивен бял гаусов шум със средна стойност нула и вариация 0.1. Размер на стъпката $\mu = 0.001$ и BPSK модулация са използване при симулацията. Фигурите илюстрират резултатната диаграма на насоченост относно $\theta_0 = 90^\circ$. Резултатите показват способността на използвания алгоритъм за получаване на

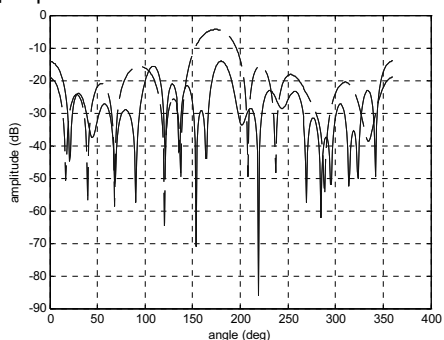
оценка с много висока точност. На Фиг. 5 са показани резултатите от симулацията при отсъствие на взаимно влияние между елементите на решетката и след компенсирани на това влияние за случая на ПЕР с $N=6$ и $M=6$ елементи и разстояние между тях $d_x = d_y = 0.3\lambda$.



Фигура 3. Диаграма на насоченост на ПЕР с $N=6$ и $M=6$ елементи.



Фигура 4. Диаграма на насоченост на ПЕР с $N=10$ и $M=10$ елементи.



Фигура 5. Диаграма на насоченост на ПЕР с $N=6$ и $M=6$ елементи:
 а) идеален случай – отсъствие на взаимно влияние (плътна линия);
 б) взаимното влияние е компенсирани (прекъсната линия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тази статия изследва правоъгълни еквилистантни smart антени с изотропни елементи. Две главни теми: адаптивно формиране на лъча и компенсиране на взаимното влияние между елементите на антенната решетка са анализирани. Тук, LMS алгоритъм е използван като техника за адаптивно формиране на диаграмата на насоченост на изследваните правоъгълни еквилистантни антенни решетки. Относно разглеждания метод и прилагането му за ПЕР се доказва и показва неговата точност и прецизност, отчитайки двата фактора: полезен сигнал (максимум) и смущаващи сигнали (формиране на нули). Фигурите, получени при симулациите илюстрират, че антенната решетка формира диаграма на насоченост с максимум относно полезния сигнал и едновременно с това – нули към смущаващите сигнали.

Числените примери и симулационните резултати показват, че оптималният вариант за геометрия на антената е ПЕР с $M=N=6$ елементи, тъй като в този случай имаме най-висока точност, поради факта, че изработването на прецизна диаграма на насоченост от smart антената се влияе от размера и геометрията на антенната решетка. Използването на по-голяма ПЕР оскъпява smart антената и тя става непрактична от гледна точка на реализация.

Работата на smart антена е изследвана за два сценария: а) без взаимно влияние; б) с компенсиране на взаимното влияние. За симулациите са използвани програми в средата на Matlab, тъй като диаграмата на излъчване и взаимните импеданси на изотропните елементи са аналитично известни. Числените резултати ясно показват колко е важно да бъде компенсирано взаимното влияние за прецизната работа на антената.

ЛИТЕРАТУРА

[1] S. Bellofiore et al., "Smart-antenna systems for mobile communication networks, part 1: overview and antenna design", IEEE Antennas and Propag. Magazine, vol. 44, pp. 106-114, 2002.

[2] S. Bellofiore et al., "Smart-antenna system analysis, integration and performance for mobile ad-hoc networks (MANETs)", IEEE Antennas and Propag., vol. 50, pp. 571-581, 2002.

[3] S. Bellofiore et al., "Smart-antenna systems for mobile communication networks, part 2: beamforming and network throughput", IEEE Antennas and Propag. Magazine, vol. 44, pp. 106-114, 2002.

[4] J. Foutz et al., "Adaptive eigen-projection beamforming algorithms for 1-D and 2-D antenna arrays", IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters, vol. 2, pp. 62-65, 2005.

[5] I.Gupta, A. Ksienski: "Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays", IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. 31, pp. 785-791, 1983.

[6] P.Ioannides, C. Balanis, "Uniform circular and rectangular arrays for adaptive beamforming applications", IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters, vol. 4, pp. 351-354, 2005.

За контакти:

Ас. инж. Вяра Йорданова Василева, ТУ - Варна, E-mail: via_vas@abv.bg.

Доц. д-р инж. Сава Василев Савов, ТУ - Варна, E-mail: svsavov@ms.ieee.bg.

Ас. инж. Мирослава Гришева Донева, ТУ - Варна, E-mail: m_grisheva@abv.bg.

Благодарност: Проект № 21 "Повишаване на научния потенциал в областта на инженерните науки и информатиката" в рамките на оперативна програма "Развитие на човешките ресурси"

Докладът е рецензиран.