مروری بر روش های شکل دادن به بیم در آرایه های آنتن

دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده ی برق و کامپیوتر

زهرا نقش

z.naghsh@ec.iut.ac.ir

چکیده

تقاضا برای سرویس های مخابرات بی سیم پیشرفت روز افزون و پر سرعتی دارد. یکی از مشکلات موجود در سیستم های مخابراتی، محدودیت باند های فرکانسی در دسترس، برای پاسخگویی به این تقاضا است. پردازش آرایه به معناي پردازش سیگنال هاي رسیده به المان هاي یک آرایه ی آنتن، براي دستيابي به اهداف مختلف مي باشد. پیش بيني مي شود پردازش آرايه بتواند نقش مهمي در برآورده كردن تقاضاي روز افزون براي سرويس هاي مخابرات بي سيم، ايفا كند. يكي از قابليت هاي مهم پردازش آرايه، شکل دادن به بیم آرایه ی آنتن است.یعنی قرار دادن null در پترن آنتن در جهت interferer ها و شکل دادن بيم اصلي آنتن در جهت منبع سیگنال دلخواه. در این مقاله مروری بر روش هاي مختلف شکل دادن به بیم کرده و کاربردها، محاسن و معایب هر کدام را بررسی می نماییم.همچنين اشاره اي به الگوريتم هاي بيم فرمينگ adaptive خواهيم كرد. به علاوه به طور مختصر اثر شرایط غیر ایده آل در عملکرد بیم فرمرها را بررسی می کنیم.

مقدمه

با توجه به افزايش روزافزون تقاضا براي سرويس‌هاي مخابرات بي سيم و محدوديت spectrum در دسترس، راه حلهاي مختلفي براي پاسخگويي به اين تقاضا در كنار اين محدوديت، پيشنهاد شده است. از جمله استفاده از آرايه‌هاي آنتن وcognitive radio .

آرایه های آنتن با روش های پردازش آرایه، در واقع به صورت فیلتر فضايي عمل كرده از اين طريق، امكان استفاده ی تعدادي user به طور همزمان از يك كانال فركانسي را فراهم مي‌كنند.آنتن هوشمند (smart antenna) یک آرایه ي آنتن است وكلمه ي هوشمند به اين ويژگي اشاره دارد كه آنتن هوشمند با هدايت توسط الگوريتم‌هاي هوشمند، مي‌تواند به منظور دستيابي به عملكرد مطلوب، خود را به صورت ديناميكي با محيط اطرافش سازگار نمايد.

آنـتن هوشـمند بـه۲ طريـق سـبب افـزايش قابليـت اطمينـان و ظرفيت سيستم مي‌گردد:

اول: تكنيك‌هاي diversity combining. يعني با تركيب سيگنالهاي دريافتي توسط آنتن هاي مختلف به طريق مناسب ،فيدينگ را كه عمدتاً ناشي از انتشار چندمسيري است، كاهش مي‌دهد. در بيشتر محيط‌ها، دايورسيتي فضايي حاصل از تركيب سيگنالهاي آنتن هاي مختلف، يك راه عملي ومؤثر و بنابراين پراستفاده است.

دوم: شکل دادن به بیم که از طریق کاهش interference و فيدينگ چند مسيري، ظرفيت سيستم را افزايش مي‌دهد.

اولين مورد استفاده از آنتن هوشمند حدود ۴۰ سال قبل در يك سيستم رادار بوده است. در تكنولوژي امروز با توجه به فضا و توان مورد نيازش، آنتن هوشمند، در base-station ها استفاده مي‌شود و استفاده از آن در ترمينالهاي موبايل هنوز در مرحله‌ي پژوهشي قرار دارد. انتظار مي‌رود در آينده پيشرفت تكنولوژي امكان استفاده از آنتن هوشمند را در ترمينالها نيز همانند base-station ها فراهم آورد.

Cognitive radio با ايجاد امكان دسترسی فرصت طلبانه (opportunistic) به spectrum، سعي در بهينه سازي استفاره از پهناي باند مي كند.اين راديو در واقع نسخه ي پيشرفته ي راديونرم افزاري است.

راديو نرم افزاري و آنتن هوشمند به پيشرفت و تحقق اهداف هم كمک مي كنند.راديونرم افزاري، نرم افزار و سخت افزار انعطاف پذير مورد نياز آنتن هوشمند را فراهم مي كند.آنتن هوشمند هم با اجراي الگوريتم هاي پردازش سيگنال مختلف روي سيگنال هاي دريافتي توسط المان هايش، به راديو نرم افزاري در رسيدن به اهدافي چون عملكرد مناسب در شرايط مختلف كانال وكار با سيستم هاي داراي فركانس هاي مختلف،كمک مي كند.

در اين مقاله روي يكي از قابليت هاي مهم آنتن هاي هوشمند يعني شكل دادن به بيم(beam-forming) متمركزمي شويم. در بخش اول به بيان مدل رياضي مورد استفاده براي آرايه و محيطي كه آرايه در آن واقع است، مي پردازيم. در ادامه در بخش دو برخي از روش هاي شكل دادن به بيم را معرفي مي كنيم.در بخش سه به الگوريتم هاي بيم فرمينگ adaptive پرداخته و در بخش چهار اشاره ي مختصري به اثر شرايط غير ايده آل در عملكرد بيم فرمر خواهيم داشت ونهايتا در بخش پنج نتيجه گيري مختصري از بحث هاي انجام شده ارائه می كنيم.

۱. مدل رياضی ونمادها

M منبع نقطه‌اي ناهمبسته سينوسي با فركانس f_0 را در نظر بگيريد. آرايه‌اي متشكل از L المان omnidirectional در يك محيط همگن و درfar field منابع قرار گرفته است. $\tau_l(\varphi_i,\theta_i)$ برابر زمانی است كه طول می كشد تا موج صفحه ای تابيده شده از جهت (φ_i,θ_i)، از مبدا مختصات تا l امين عنصر آرايه برسد.

سيگنال تابيده شده به المان مرجع (المان واقع در مبدأ) به صورت $m_i(t)e^{jr\pi f.t}$ بيان مي‌شود كه در آن $m_i(t)$ تابع مدوله كننده است. $m_i(t)$ معمولاً به صورت يك فرايند تصادفي مختلط پايين گذر با ميانگين۰ و واريانسي برابر p_i (توان منبع i ام اندازه گيري شده در محل المان مرجع) مدل مي‌شود.

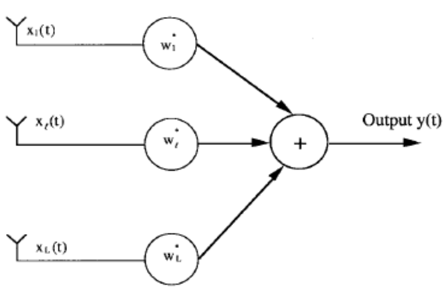
با فرض باند باريک بودن $m_i(t)$ و كوچك بودن ابعاد آرايه به اندازه كافي، سيگنال تابيده شده به المان l ام به صورت روبرو است:

$$m_i(t)e^{j2\pi f_0(t+\tau_l(\varphi_i,\theta_i))}$$

بنا بر آنچه گفته شد سيگنال رسيده از M منبع به المان l ام آرايه به صورت زير است:

$$x_l=\sum_{i=1}^{M} m_i(t)e^{jr\pi f_0(t+\tau_l(\varphi_i,\theta_i))}+n_l(t)$$

كه در آن $n_l(t)$ نويز است كه به صورت يك فرايند تصادفي سفيد با ميانگين صفر و واريانس σ_n^2، مدل مي‌شود.
اگر المانهاي آرايه omnidirectional نبودند، بايد ضريب مربوط به جهت (φ_i,θ_i) براي هريك از المانها را در عبارت فوق (x_l) دخالت مي‌داديم.
در شكل ۱ يك بيم فرمر باند باريک نشان داده شده است. البته بلوكهايي چون تقويت كننده و BPF در شكل نشان داده نشده اند.



شكل۱:بيم فرمر باند باريک

مطابق شكل داريم:

$$\underline{w}=[w_1,w_2,...w_L]^T \qquad ,\underline{x}(t)=[x_1(t)...x_L(t)]^T$$

$$y(t)=w^H\,\underline{x}(t)$$

اگر درايه‌هاي بردار x(t) را فرايندهاي ايستان با ميانگين 0 در نظر بگيريم، توان متوسط خروجي بيم فرم براي يك w برابر است با:

$$p(w)=E[y(t)y^*(t)]=w^H Rw$$

که در آن $R = E[x(t)\, x^H(t)]$. درایه های R، همبستگي بين المانهاي آرايه را نشان مي‌دهند. بردار s_i متناظر با منبع i ام را به شکل زیر تعریف می کنیم:

$$\underset{-i}{s} = [\exp(j2\pi f_0 \tau_1(\varphi_i,\theta_i)),...,\exp(j2\pi f_0 \tau_L(\varphi_i,\theta_i))]^T$$

بهره آرايه : نسبت SNR خروجي آرايه به SNR ورودي آن.

جهت look :جهتی که مایل به دریافت سیگنال از آن هستیم. s_0 بردار متناظر جهت look است.

۲ . برخی روش های شکل دادن به بیم

۱.۲. بیم فرمر **delay-and-sum**

در اين بيم فرمر تمام وزنها دامنه مساوي دارند. اگر s_0 بردار متناظر جهت look باشد، بردار وزن عبارت است از:

$$w = \frac{1}{L}\underset{-0}{s}$$

با اين انتخاب، توان متوسط خروجي بيم فرمر ناشي از سيگنال در جهت look، برابر توان منبع واقع در آن جهت است. اصطلاحاً گين در جهت look واحد است. بردار سيگنال آرايه مربوط به جهت look عبارت است از:

بنابراين:

$$\underset{-s}{x}(t) = m_s(t) e^{j2\pi f_0 t}\, \underset{-0}{s}$$

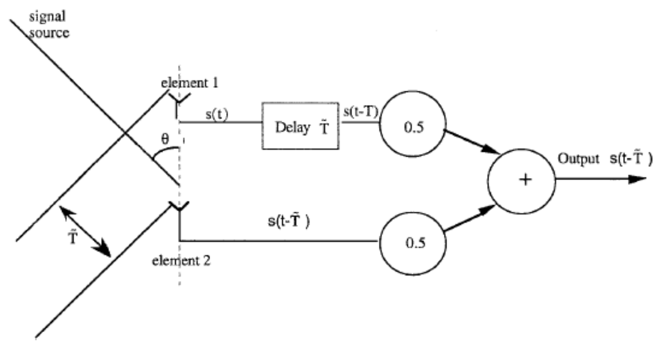
$$y(t) = w^H \underset{-s}{x}(t) = m_s(t)\ \ e^{jr\pi f_0 t}$$

$$p(w) = p_s$$

در واقع مثل اين است که با حرکت آرايه به صورت مکانيکي بيم آن را در جهت look قرار دهيم.البته اين کار در بيم فرمر به صورت الکترونيکي صورت مي‌گيرد.براي درك بيشتر اين بيم فرمر مي‌توان شکل ۲ را بررسي نمود.

در اين شکل ولتاژ القايي در المان اول s(t) و ولتاژ القايي در المان دوم $s(t-\tilde{T})$ است.

با ایجاد تأخیر $\tilde{T}$ در خروجي المان اول و سپس اعمال ضريب ۰/۵ در ۲ شاخه، خروجي بيم فرمر $s(t-\tilde{T})$ است که بهره ی واحد را در جهت θ نتيجه مي‌دهد.



شکل ۲ :بیم فرمر delay-and-sum با دو المان

در محيطي که interferer موجود در فرکانس f_0 نداريم و نويز ناهمبسته است، اين بيم فرمر SNR ماکسي موم را نتيجه مي‌دهد:

$$R_N = \sigma_n^2\, I \qquad P_N = w^n\ \ R_N\ w\ = \frac{\sigma^2{}_n}{L}$$

SNR ورودي برابر $\frac{P_s}{\sigma_n^2}$ و SNR خروجي برابر $\frac{P_s L}{\sigma_n^2}$ است. بنابراين بهره آرايه برابر L مي‌باشد.

۲.۲. بیم فرمر **null-steering**

بيم فرمر null-steering، به منظور cancel کردن موج صفحه‌اي رسيده از چند جهت معلوم به کار مي‌رود.

در یکی از ابتدایی ترین روش ها، ابتدا توسط بيم فرمر delay-and-sum، بهره ي واحد در جهت interferer ايجاد مي‌شود و سپس سيگنال خروجي از سيگنال تك تك عناصر آرايه کاسته مي‌شود. اين روش براي cancel کردن interferer هاي قوي بسيار مؤثر است. اگر بيش از يك interferer داشته باشيم، با تکرار روند فوق آنها را حذف مي‌نماييم که در اين حالت اين روش به صرفه نيست.

روش دیگر:

اگر $\underset{-0}{s}$ بردار مربوط به جهت منبع و $\underset{-1}{s},...,\underset{-k}{s}$ بردارهاي مربوط به جهت‌هاي k عدد interferer باشند، بردار وزن مطلوب بايد در معادلات زير صدق کند.

$$w^H \underset{-0}{s} = 1$$

$$w^H \underset{-i}{s} = 0 \qquad\qquad i = 1,...,k$$

که معادلات فوق در فرم ماتریسی به شکل $w^H A = c_1^T$ در مي‌آيند که در آن:

$$A = [\underset{-0}{s}, \underset{-1}{s}, ..., \underset{-k}{s}] \qquad , c_1 = [1,0,...,0]^T$$

پس: $w^H = c_1^T A^{-1}$

که با توجه به C_1، سطر اول ماتريس A، همان بردار وزنهاي مطلوب است.

با اين روش گرچه بهره واحد در جهت سيگنال دلخواه و بهره صفر در جهت interferer ها ايجاد مي‌شود، اما نويز ناهمبسته ميني موم نمي شود.

لازم به ذكر است كه قرار دادن null مي‌تواند در گيرنده براي خنثی كردن interferer ها و در فرستنده براي عدم ايجاد مزاحمت براي سايرين، به كار رود.

۳.۲. بيم فرمر بهينه

در بيم فرمر null-steering نياز به دانستن جهت منبع و interferer ها بود و به علاوه SNR خروجي ماكسي موم نمي شد. بيم فرمينگ بهينه اين مشكلات را تا حدي برطرف مي‌كند.

براي يك آرايه ي غيرمقيد SNR خروجي با انتخاب w به شكل زير ماكسي موم مي‌شود.

$$\hat{w} = \mu_0 R_N^{-1} \underset{-0}{s}$$

كه در آن R_N ماتريس همبستگي آرايه فقط ناشي از نويز و interferer ها و μ_0 يك ثابت است.

براي آرايه ي مقيد به داشتن پاسخ واحد در جهت look (φ_0, θ_0)، SNR خروجي با وزن هاي زير ماكسي موم مي‌شود :

$$\mu_0 = \frac{1}{\underset{-0}{s}^H R_N^{-1} \underset{-0}{s}} \Rightarrow \hat{w} = \frac{R_N^{-1} \underset{-0}{s}}{\underset{-0}{s}^H R_N^{-1} \underset{-0}{s}}$$

در عمل وقتي تخمين ماتريس R_N در دسترس نباشد، از ماتريس R استفاده مي‌شود. در اين حالت پاسخ مسئله بهينه‌سازي زير كه مقيد به داشتن پاسخ واحد در جهت look و در عين حال حداكثركننده SNR است، بردار وزنها را نتيجه مي‌دهد.

$$\left.\begin{array}{l} \min\limits_{w} \; w^H R \, w \\ subject \;\; to \quad w^H \underset{-0}{s} = 1 \end{array}\right\} \Rightarrow \hat{w} = \frac{R^{-1} \underset{-0}{s}}{\underset{-0}{s}^H R^{-1} \underset{-0}{s}}$$

قيد موجود در مسئله، تضمين مي‌كند كه متوسط توان خروجي ناشي از منبع واقع در جهت look ، برابر توان آن منبع است. بنابراين سيگنال منبع جهت look بدون distortion از بيم فرمر عبور مي‌كند. سپس مسئله ميني موم سازي، توان كل نويز شامل نويز ناهمبسته و interferer ها را در خروجي حداقل مي‌كند. ميني موم كردن كل توان نويز در خروجي در عين ثابت نگه داشتن توان سيگنال در خروجي، معادل ماكسي موم كردن SNR است. لازم به ذكر است كه با استفاده از R يا R_N، يك جواب براي وزنها بدست مي‌آيد.

براي حالت ساده ي محيط نويزي بدون interferer مي‌توان نشان داد: $\hat{w} = \frac{\underset{-0}{s}}{L}$ كه همان پاسخ بيم فرمر delay-and-sum است. بنابراين بيم فرمر delay-and-sum در غياب interferer بهينه است. SNR خروجي $(\hat{\alpha})$ و بهره ي آرايه $(\hat{G})$ در اين حالت عبارتند از:

$$\hat{\alpha} = \left(\frac{p_s L}{\sigma_n^2}\right) \times \frac{\rho + \frac{\sigma_n^2}{P_I L}}{1 + \frac{\sigma_n^2}{P_I L}}$$

$$\hat{G} = \frac{P_I L}{\sigma_n^2} \times \frac{\left(1 + \frac{\sigma_n^2}{PI}\right) . \left(\rho + \frac{\sigma_n^2}{P_I L}\right)}{1 + P_I}$$

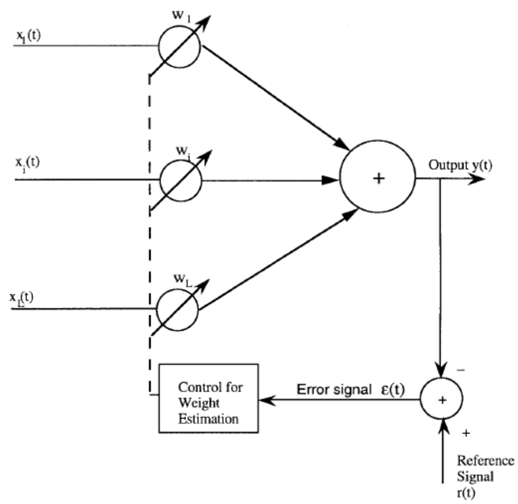
$$\rho = 1 - \frac{\underset{-0}{s}^H \underset{-I}{s} \underset{-I}{s}^H \underset{-0}{s}}{L^2}$$

(زير نويس I مربوط به interferer است.)

ρ به ابعاد آرايه و جهت نسبي interferer و source بستگی دارد.

۱.۳.۲. بهینه سازی با استفاده از سیگنال مرجع

گاهي به اندازه ي كافي از ويژگي هاي سيگنال مطلوب اطلاع داريم و مي تواتيم یک سيگنال مرجع مناسب بسازيم و با ميني موم كردن اختلاف بين آن سيگنال و خروجي بيم فرمر، به عملكرد خوبي برسيم.مثلا اگر سيگنال مطلوب AM باشد، نشان داده شده با در نظر گرفتن سيگنال مرجع برابر كرير، به عملكرد خوبي مي رسيم. در شكل ۳ يك بيم فرمر باند باریک كه از يك سيگنال مرجع براي بدست آوردن وزنها استفاده مي‌كند، نشان داده شده است.



شکل ۳ : ساختار بیم فرمر با استفاده از سیگنال مرجع

خروجي آرايه از سيگنال مرجع r(t) كم مي‌شود و سيگنال خطا ($\varepsilon(t)$) را توليد مي‌كند.

$$\varepsilon(t) = r(t) - \underline{w}^H \underline{x}(t)$$

$$MSE = E[|\varepsilon(t)|^2] = E[|r(t)|^2] + \underline{w}^H R \underline{w} - 2\underline{w}^H \underline{z}$$

$$\underline{z} = E\left(\underline{x}(t).r(t)\right)$$

(Mean Square Error)MSE يك تابع درجه ۲ از $\underline{w}$ است و هنگامي ميني موم مي‌شود كه گراديان آن نسبت به $\underline{w}$ صفر شود.

در نتيجه

$$\hat{\underline{w}}_{MSE} = R^{-1} \underline{z}$$

(Minimum Mean Square Error)MMSE در این بیم فرمر برابر است با:

$$MMSE = E[|r(t)^2|] - \underline{z}^H R^{-1} \underline{z}$$

این بیم فرمر، يك بيم فرمر حلقه بسته است، در حالي كه بيم فرمر بهینه ی معمولی حلقه باز بود.

وقتي سيگنا ل منبع ضعيف باشد، اين بيم فرمرSNR بهتري را نسبت به بيم فرمر بهینه ی معمولی نتیجه می‌دهد. اما با بزرگ شدن توان منبع در مقايسه با نويز، دو بيم فرمر مذكور تقريباً نتيجه يكساني مي‌دهند. در حالت سيگنال ضعيف، بهبود SNR اين بيم فرمر، به قیمت ايجاد distortion در سيگنال مطلوب است. در حالي كه بيم فرمر بهینه ی معمولی در سيگنال مطلوب distortion ايجاد نمي‌كند.

۴.۲. Beam-space processor

روش های بیان شده تا به حال در دسته ی element-space processing قرار داشتند كه در آن سيگنال هر المان آرايه وزن دهي شده و سپس سيگنالها جمع مي‌شوند و خروجي آرايه را نتيجه مي‌دهند.اما در beam-space processing ، پردازش در ۲ مرحله انجام مي‌گيرد.

ابتدا با استفاده از سيگنال‌هاي المان‌هاي آرايه، تعدادي بيم (يك بيم اصلي و تعدادي بيم كمكي) ايجاد مي‌شود، سپس اين بيم ها وزن دهي شده، با هم جمع مي‌شوند و خروجي نهايي را نتيجه مي‌دهند. در حالت كلي براي يك آرايه با L المان، يك beam-space processor، يك بيم اصلي و حداكثر L-1 بيم كمكي دارد.بیم اصلی توسط مجموعه ای از وزن های ثابت، در جهت سیگنال مورد علاقه تنظیم می شود.بیم های کمکی طوري وزن دهي مي‌شوند كه تقريبي از interference موجود در بيم اصلي ايجاد نموده با كم كردن مجموع وزن دهي شده ي آنها از بيم اصلي، interference موجود در بيم اصلي cancel شود. در اين راستا، لازم است روشي به كار رود كه بيم‌هاي كمكي در جهت look حاوي سيگنال نباشند. چون در غير اين صورت كم كردن مجموع وزن دار آنها از بيم اصلي سبب cancel شدن سيگنال مورد علاقه خواهد شد.

پترن بیم اصلي مي‌تواند توسط وزن‌ها، به شکل دلخواه و در جهت سیگنال مورد علاقه، تنظیم شود. مثلاً براي یك آرایه یك بعدي متسا وي الفاصله، اگروزن ها یکنواخت انتخاب شوند، شکل کلي پترن $\frac{\sin LX}{\sin x}$ است. یا اگروزنها بر اساس چند جمله‌اي چبي شف انتخاب شوند، لب هاي فرعي دامنه ي مساوي خواهند داشت.

اگر بردار x(t)، بردار سیگنالهاي رسیده به المانهاي آرایه باشد و هر درایه ي آن را در مزدوج درایه متناظر از بردار s_0 ضرب کنیم، مؤلفه سیگنال جهت look در همه درایه‌ها یکسان خواهد شد. حال با انتخاب ماتریس $B_{L\times(M-1)}$ $(M \le L)$ که ستونهاي آن مستقل خطي بوده، جمع عناصر هر ستون برابر صفر است و قرار دادن $q = \underline{x}^H(t)B$ به بردار M-1 تایي q مي‌رسیم . در واقع M-1 بیم مستقل داریم که در جهت look ، null دارند.

اگر عناصر x(t) را مستقیماً در رابطه $q = \underline{x}^H(t)B$ قرار دهیم (بدون ضرب در مزدوج عنصر متناظر s_0^H)، لازم است ماتریس B علاوه بر داشتن ستونهاي مستقل، شرط $\underline{s}_0^H B = 0$ را هم برآورده کند.

واضح است براي وجود امکان مستقل بودن بیم‌ها، لازم است $M \le L$.

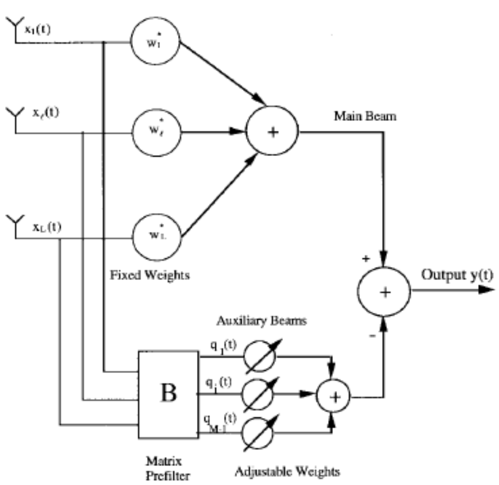
وقتي M=L، تعداد درجات آزادي براي ایجاد null در پترن، مانند بیم فرمر element-space با L المان است. در این حالت به آرایه fully adaptive مي‌گویند.

اما اگر M<L، تعداد درجات آزادي براي ایجاد null برابر M-1 است و به آرایه partially adaptive گویند که در این حالت، اگر الگوریتم‌هاي adaptive براي تخمین وزنها به کار رود، همگرایي سریع‌تر از حالت fully adaptive خواهد بود.

beam-space processor ها در مواردي که تعداد interferer ها بسیار کمتر از تعداد المانها است، مفیدند و در مقایسه با بیم فرمرهاي element-space ، به محاسبات کمتري نیاز دارند چون باید M-1 وزن بهینه انتخاب شود که در مورد بیم فرمرهاي element-space، این تعداد برابر L وزن بود. (M < L)

در حالت کلي، بیم فرمر beam-space، نسبت به بیم فرمر element-space به محاسبات کمتري نیاز دارد. چون در بیم فرمر beam-space یك مسئله بهینه سازي غیرمقید حل مي‌شود. در واقع قیدهایي که در بیم فرمر element-space به منظور جلوگیري از ایجاد distortion در سیگنال جهت look اعمال مي شد، الان توسط قرار دادن بیم اصلي در جهت look تأمین مي‌شود و وزنهاي مربوط به بیم‌هاي کمکي به صورت غیرمقید، بهینه مي‌شوند.

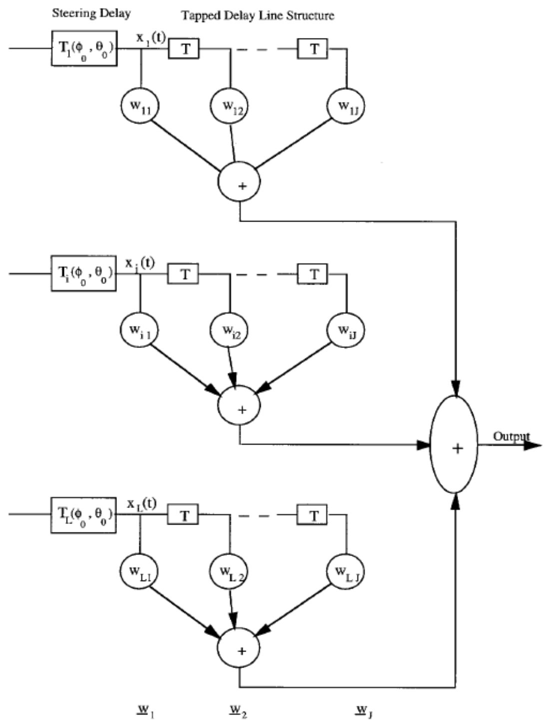
مقایسه عملکرد این دو نوع بیم فرمر در موارد زیادي صورت گرفته است.مثلا وقتي جهت واقعي سیگنال مطلوب با جهت look تشخیص داده شده توسط ما متفاوت باشد، در بیم فرمر element-space، با سیگنال مطلوب مثل یك interferer نزدیك جهت look رفتار شده، در نتیجه سیگنال مطلوب cancel مي‌شود. اما در بیم فرمر beam-space، بیم اصلي که در جهت look مفروض تنظیم شده، در جهت look واقعي اندکي تضعیف مي شود. بیم‌هاي کمکي هم که در جهت look مفروض، null داشته اند در جهت look واقعي نشتي کمي دارند (مقدار کمي از سیگنال مطلوب را عبور مي‌دهند). بنابراین در اثر کم شدن مجموع وزن دار بیم‌هاي کمکي از بیم‌هاي اصلي، سیگنال مطلوب کمي ضعیف‌تر از حالتي که جهت look درست تشخیص داده شده بود، در خروجي آرایه ظاهر مي‌شود.



شکل ۴ : Beam-space processor

۵.۲. بیم فرمر باند وسیع

بیم فرمر شکل ۱ که تا کنون بحثهایي درباره ي آن بود، براي سیگنالهاي باند باریک به کار مي‌رود و با افزایش پهناي باند سیگنال، عملکرد آن افت پیدا مي‌کند. براي سیگنال هاي باند وسیع از بیم فرمر شکل ۵ استفاده مي‌کنیم.



شکل ۵ :بیم فرمر باند وسیع

در این بیم فرمر با فرض آن که بدانیم منبع در (φ_0,θ_0) واقع است، ابتدا سیگنالهاي رسیده به هر المان به اندازه‌ي $T_l(\varphi_0,\theta_0)$ تأخیر داده مي‌شوند:

$$T_l = (\varphi_0,\theta_0) = T_0 + \tau_l(\varphi_0,\theta_0) \quad l = 1,2,...,L$$

T_0 تأخیر ثابتي است و به گونه‌اي انتخاب مي‌شود کـه داشـته باشیم: $T_l(\varphi_0,\theta_0) > 0, \forall l$

اگر s(t) سیگنال رسیده به المان واقع در مبداء مختصات (المان مرجع) از یك منبع باند وسیع واقع در (φ_0,θ_0) باشد، داریم:

$$x_l(t) = s(t \ + \tau_l(\varphi_0,\theta_0) - T_l(\varphi_0,\theta_0))$$

در نتیجه براي منبع واقع در (φ_0,θ_0) داریم:

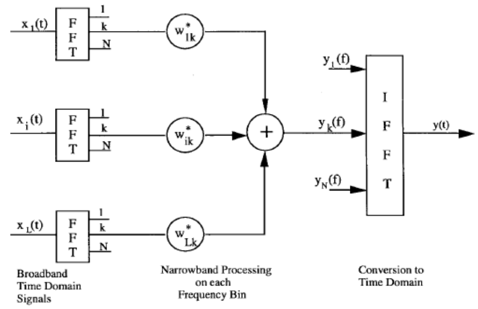
$$x_l(t) = s(t - T_0) \qquad l = 1,...,L$$

در نتیجه مؤلفه ي سیگنال در همه المانها پس از بلوك تأخیر یکسان است. به دنبال هر بلوك تأخیر یك فیلتر FIR قرار داده و در این حالت بر خلاف بیم فرمر باند باریک وزنها که همان ضرایب فیلتر FIR اند، حقیقي مي‌باشند. با تعریف $\underline{w} = [\underline{w}_1, \underline{w}_2, ..., \underline{w}_J]^T$ که یك بردار LJ×1 حاوي LJ ضریب مربوط به L فیلتر FIR است، ($\underline{w}_i$ مطابق شکل شامل L ضریب بعد از (i-1) امین tap است)، در این بیم فرمر این LJ ضریب را براي رسیدن به عملکرد دلخواهمان، تنظیم مي کنیم.

۶.۲. بیم فرمر حوزه ی فرکانس

ساختار کلي یك بیم فرمر element-space حوزه ي فرکانس در شکل ۶ نشان داده شده است. سیگنال باند وسیع رسیده به هر المان، توسط FFT به حوزه ي فرکانس برده مي‌شود. سپس هر فرکانس توسط یك بیم فرمر باند باریک پردازش مي‌شود. وزنهاي مربوط به هر فرکانس به طور مستقل از هم و به منظور حداقل کردن متوسط توان خروجي در آن فرکانس، تحت قیود مربوط به سیگنال منبع و interferer ها انتخاب مي‌شوند. بنابراین پردازش فرکانس‌هاي مختلف مي‌تواند به صورت موازي صورت گیرد و در نتیجه سرعت بیم فرمر افزایش یابد. همچنین در صورت بکارگیري الگوریتم‌هاي adaptive مانندLMS، step size در فرکانس‌هاي مختلف مي‌تواند متفاوت باشد و به منظور همگرايي سریع‌تر به طور مناسب انتخاب گردد.

نشان داده شده به دلیل ساختار modular موازي، اثر کوانتیزه کردن ضرایب فیلترها در این بیم فرمر، کمتر از بیم فرمر حوزه ي زمان است.

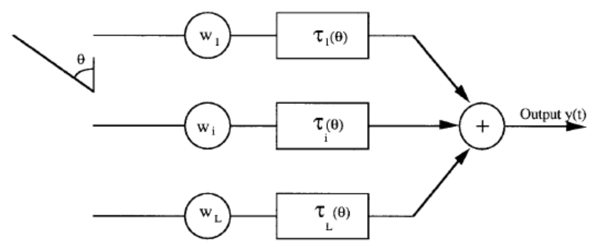


شکل ۶ :بیم فرمر حوزه ی فرکانس

۷.۲. بیم فرمر دیجیتال

بیم فرمر آنالوگ شکل ۷ را در نظر بگیرید که خروجي آن از رابطه ي زیر بدست مي‌آید:

$$y(t)=\sum_{i=1}^{L} w_i x_i(t-\tau_i(\theta))$$



شکل ۷ :بیم فرمر آنالوگ

تأخیرها به منظور یکسان سازي سیگنال جهت $look(\theta)$ در همه ي المانها انتخاب مي‌شوند. در واقع این شکل همان بیم فرمر delay-and-sum است که قبلاً بررسي شده است.

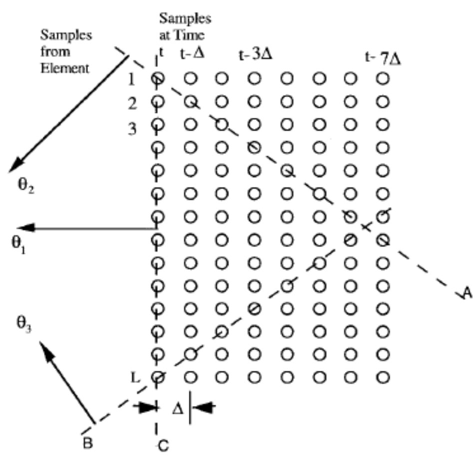
در بیم فرمر دیجیتال، سیگنالهاي وزن یافته از هر المان (پس از ضرب در w_i و قبل از تأخیر)، نمونه‌برداري مي‌شوند. سپس با جمع کردن نمونه‌هاي مناسب از سیگنال المانهاي مختلف، تأخیرها را به صورت دیجیتال پیاده‌سازي مي‌کنیم.

واضح است که در این روش لازم است تأخیرها ضرایب صحیحي از دوره‌ي نمونه‌برداري (Δ) باشند.

در شکل ۸ فرض کنید تأخیرهاي لازم براي قرار دادن بیم در جهت θ_2 به صورت $\tau_i(\theta_2)=(i-1)\Delta$ باشند. مطابق شکل با جمع کردن نمونه‌هاي واقع روي خط چین A مي‌توان این تأخیر را تحقق بخشید.

با استدلال مشابه نمونه‌هاي روي خط چین B بیم را در جهت θ_1 قرار و نمونه‌هاي روي خط چینC بیم را در جهت θ_3 مي‌دهند. بر این مبنا تنها مي‌توان بیم را در جهاتي قرار داد (به صورت دقیق) که تأخیر لازم در المانها براي آن جهت، به صورت $i=1,2,...,L$ $\tau_i(\theta)=k_i\Delta$ باشد که k_i ها اعداد صحیح‌اند.

تعداد این جهات با کاهش Δ (افزایش نرخ نمونه‌برداري)افزایش مي‌یابد.



شکل ۸ : بیم فرمر دیجیتال

مي‌توان با به کار بردن یك جمع کننده ي مجهز براي هر θ، تعدادي از این بیم‌ها را به صورت همزمان شکل داد.

۳. الگوریتم های بیم فرمینگ ***adaptive***

در عمل به ماتریس R یا R_N که در روشهاي بیان شده براي محاسبه وزن‌هاي بهینه لازم بود، دسترسي نداریم. بنابراین با استفاده از اطلاعات بدست آمده از سیگنال ورودي و ... وزنها توسط الگوریتم‌هایي که الگوریتم‌هاي adaptive نام دارند، به سمت تخمیني از وزنهاي بهینه حرکت مي‌کنند. در ادامه به بررسي تعدادي از این الگوریتم‌ها مي‌پردازیم:

۱.۳. الگوريتم LMS

الگوريتم LMS بسيار پراستفاده است. بنابراين در اينجا به بررسي آن مي‌پردازيم.

دو نوع الگوريتم LMS داريم: ۱) الگوريتم LMS غيرمقيد. يعني وزن ها در هرتكرار مقيد نيستند.

۲) الگوريتم LMS مقيد كه در هرتكرار وزنها مقيد به برآورده كردن قيد (قيود) خاصي هستند. معمولاً در مواقعي كه از سيگنال مرجع استفاده مي‌شود و اطلاعي از جهت سيگنال نداريم، الگوريتم LMS غيرمقيد استفاده مي‌شود.

الگوريتم LMS در هرتكرار، گراديان پوسته ي خطا را تخمين مي‌زند و وزنها را به گونه‌اي update مي‌كند كه به اندازه ي كمي (μ) در جهت منفي گراديان روي پوسته ،جابجايي صورت مي‌گيرد. به μ ، step size مي‌گويند. با انتخاب μ به اندازه ي كافي كوچك، الگوريتم همگرا مي‌شود. انتخاب μ در رفتار حالت گذارى الگوريتم، خطاي نهايي و سرعت آن تأثير زيادي دارد كه در ادامه به آن مي‌پردازيم.

۱.۱.۳. الگوريتم LMS غير مقيد

اين الگوريتم با استفاده از سيگنال مرجع براي تخمين $\hat{w}_{MSE}$ به صورت زير وزنها را به روز مي‌كند:

$$\underline{w}(n+1) = \underline{w}(n) - \mu\, \underline{g}(\underline{w}(n))$$

كه در آن $\underline{w}(n+1)$ وزنهاي محاسبه شده در مرحله (n + 1) ام است. μ يك ثابت مثبت (step size) است كه مشخص كننده ي سرعت و ميزان نزديكي پاسخ نهايي الگوريتم به وزنهاي بهينه مى باشد. $\underline{g}(\underline{w}(n))$ هم تخمين گراديان MSE است:

$$MSE(\underline{w}(n) = E[|\, r(n+1)\,|^2] + \underline{w}^H(n) R\, \underline{w}(n) - 2\, \underline{w}^H(n)\, \underline{z}$$

$$\nabla_{\underline{w}} MSE(\underline{w})\,|_{\underline{w}=\underline{w}(n)} = 2R\, \underline{w}(n) - 2\, \underline{z}$$

$$y(n) = \underline{w}^H(n) x(n+1)$$

در فرم استاندارد الگوريتم، به جاي R و z از تخمين‌هاي نويزي آن استفاده مي‌شود. پس داريم:

$$\underline{g}(\underline{w}(n)) = 2\, \underline{x}(n+1)\, \underline{x}^H(n+1)\, \underline{w}(n) - 2\, \underline{x}(n+1)\, r(n+1)$$

$$= 2\, \underline{x}(n+1) \varepsilon^*(\underline{w}(n))$$

$$\varepsilon(\underline{w}(n)) = \underline{w}^H(n)\, \underline{x}(n+1) - r(n+1)$$

اگر $\lambda_{\max}$ بزرگترين مقدار ويژه‌ي R باشد و $\mu < \frac{1}{\lambda_{\max}}$ انتخاب شود، الگوريتم پايدار بوده، مقدار متوسط وزنهاي تخمين زده شده به وزنهاي بهينه همگرا مي‌شود.

سرعت همگرايي الگوريتم، در واقع سرعت رسيدن مقدار متوسط وزنهاي تخمين زده شده (اين متوسط روي تعداد زيادي از دورهاي الگوريتم محاسبه مي‌شود) به وزنهاي بهينه است.

هرچه گستره ي مقادير ويژه ي R بيشتر باشد، زمان همگرايي بيشتر و در نتيجه سرعت آن كمتر است.

در يك سيستم مخابراتي موبايل سرعت همگرايي اهميت زيادي دارد. در اين حالت زمان در دسترس براي همگرايي الگوريتم به ۲ عامل وابسته است: اول طراحي سيستم كه مشخص مي‌كند طول دوره‌ي زماني حضور سيگنال چقدر است (مثلاً عرض slot زماني در سيستم TDMA). دوم سرعت حركت موبايل كه ريت فيد را تغيير مي‌دهد. مثلاً براي يك موبايل كه با سرعت حركت انسان مي‌كند، ريت فيد ۵ HZ است، در حالي كه براي موبايلى كه با سرعت معمول يك اتومبيل حركت مي‌كند، ريت فيد ۵۰ Hz است. بنابراين موبايل داراي سرعت اتومبيل، نياز به سرعت همگرايي بيشتر الگوريتم دارد . لازم به ذكر است الگوريتم LMS بعضاً داراي سرعت كافي نمي‌باشد و بايد از الگوريتم‌هاي سريعتر بهره جست.

حتي در حالت همگرايي متوسط وزنها به وزن بهينه، يك كوواريانس محدود موجود است. يعني با تعريف ماتريس كوواريانس به شكل روبرو، همه ي عناصر آن برابر صفر نخواهد بود.

$$K_{\underline{w}\underline{w}}(n) = E[(\underline{w}(n) - \bar{\underline{w}})(\underline{w}(n) - \bar{\underline{w}})]$$

$\overline{w} = E[\underline{w}(n)]$ متوسط وزنهاي تخميني تا دوره‌ي n ام الگوريتم است.

اين امر سبب می شود متوسط MSE، به MMSE همگرا نشود، بلكه مقداري اضافه بر MMSE داشته باشد.

نسبت متوسط خطاي اضافي در الگوريتم LMS به MMSE، misadjustment ناميده مي‌شود.

اين پارامتركارايی (performance) الگوريتم را نشان مي‌دهد. misadjustment نوعي نويز است كه منشأ آن استفاده از تخمين نويزي گراديان در الگوريتم مي‌باشد.

افزايش μ سبب افزايش misadjustment مي‌شود، از سوي ديگر افزايش μ، سبب افزايش سرعت همگرايي الگوريتم مي شود. بنابراين در انتخاب μ بين دو خواسته‌ي زير، trade off داريم:

۱) رسيدن به همسايگي نقطه بهينه در زمان كمتر، كه در نتيجه misadjustment بزرگتري خواهيم داشت و در پايان در محدوده ي بزرگتري اطراف نقطه ي بهينه دائماً در حركتيم.

۲) رسيدن به همسايگي كوچكي از نقطه ي بهينه، كه در اين صورت به دليل نياز به μ كوچك، سرعت الگوريتم در اين حالت كاهش مي‌يابد. اما در نهايت در محدوده ي كوچكتري اطراف نقطه‌ي بهينه در حركتيم.

براي رفع trade off موجود راه حلهاي مختلفي پيشنهاد شده است از جمله اين كه، μ در مراحل مختلف الگوريتم متغير بوده با توجه به MSE آن مرحله تنظيم شود. (يعني اگر MSE زياد شد μ زياد شود و برعكس)

۲.۳. الگوريتم **RLS**

ديديم كه همگرايي الگوريتم LMS وابسته به مقادير ويژه‌ي R است و در محيطي كه R توزيع مقادير ويژه‌ي گسترده اي داشته باشد، سرعت الگوريتم LMS بسيار كم خواهد بود.

اين مشكل توسط الگوريتم RLS حل مي‌شود. در الگوريتم RLS، μ با $R^{-1}(n)$ به شكل زير جايگزين مي‌گردد:

$$\underline{w}(n) = \underline{w}(n-1) - R^{-1}(n)\, \underline{x}(n)\, \varepsilon^*(\underline{w}(n-1))$$

$$R(n) = \delta_0\, R(n-1) + \underline{x}(n)\, \underline{x}^H(n) = \sum_{k=0}^{n} \delta_0^{n-k}\, \underline{x}(k)\, \underline{x}^H(k)$$

δ_0 يك اسكالر حقيقي نزديك به يك (كوچكتر از يك) است كه داده‌هاي قبلي را به صورت نمايي وزن دهي مي‌كند. به آن فاكتور فراموشي (forgetting factor) گويند. چون با update شدن وزنها به تدريج اثر داده‌هاي گذشته در وزنهاي جديد كم و كمتر خواهد شد. به $\frac{1}{1-\delta_0}$ حافظه‌ي الگوريتم گويند. بنابراين اگر مثلاً $\delta_0 = 0/96$، حافظه‌ي الگوريتم نزديك به ۱۰۰ نمونه خواهد بود.

در اين الگوريتم $R^{-1}(n)$ با رابطه‌ي زير محاسبه مي‌گردد:

$$R^{-1}(n) = \frac{1}{\delta_0}\left[R^{-1}(n-1) - \frac{R^{-1}(n-1)\, \underline{x}(n)\, \underline{x}^H(n)\, R^{-1}(n-1)}{\delta_0 + \underline{x}^H(n)\, R^{-1}(n-1)\, \underline{x}(n)} \right]$$

$$, R^{-1}(0) = \frac{1}{\varepsilon_0} I \quad \varepsilon_0 > 0$$

مطالعاتي در زمينـه نحـوه انتخـاب ε_0 و اثـر آن در عملكـرد الگوريتم صورت گرفته است.

الگـــــوريتم RLS در هـــــــر دوره $J(n) = \sum_{k=0}^{n} \delta_0^{n-k}\, |\, \varepsilon(k)\,|^2$ را مينـيمـوم مـي‌كنـد و همگرايي آن مستقل از مقـادير ويـژه‌ي R است. صـورتهاي بهبود يافته‌ي الگوريتم RLS از نظـر محاسبات لازم و ... نيـز معرفي شده‌اند. مقايسه‌اي بين سرعت همگرايي الگوريتمهـاي RLS، LMS و ساير الگوريتمهـايي كـه مبتنـي بـر گراديـان عمل مـي‌كننـد، نشـان داده اسـت كـه RLS پربـازده‌تـرين و LMSآهسته‌ترين الگوريتم است. همچنين مطالعـات، برتـري RLS را در شـبكه‌هـاي موبايــل flat-fading نسـبت بـه LMS نشان داده است.

۴. اثر خطاهای مختلف بر عملکرد بیم فرمرها

درمطالعه ی تئوری بیم فرمر ها و الگوریتم های adaptive ، فرض بر ايده آل بودن (عاري از خطا بودن) شرايط مفروض است. در حالي كه در عمل، رسيدن به شرايط ايده آل بسيار مشكل است و بعضي پارامترها و شرايط با حالت ايده آل خود فاصله دارند . تغيير پارامترهاي آرايه نسبت به شرايط ايده‌آلي كه عملكرد سيستم به صورت تئوري براي آن شرايط پيش بيني شده، سبب تضعيف عملكرد، مثلاً كاهش گين آرايه وتغيير پترن مطلوب مي‌گردد.

روشهاي مختلفي براي حل اين مشكل و بهبود عملكرد سيستم در شرايط غير ايده آل پيشنهاد شده است كه به آنها تکنیک های پردازش سیگنال مقاوم (robust) مي‌گويند. در ادامه به بررسي برخي از شرايط غير ايده آل مي‌پردازيم.

۱.۴. خطا در تشخيص جهت **look**

براي مقيد كردن آرايه به داشتن پاسخ دلخواه در جهت look ، نياز به آگاهي از اين جهت (جهت سيگنال مطلوب كه جهت look ناميده مي‌شود) داريم. مثلاً وزنهاي بيم فرمر بهينه، بر مبناي مينيموم كردن توان خروجي مشروط به پاسخ واحد در جهت look، حاصل مي‌شوند. با منابعي كه در جهت look قرار ندارند، مانند interference رفتار مي‌شود. به اين معنا كه طي فرايند حداقل كردن توان، سيگنال آن منبع cancel مي‌شود.

اين نشان دهنده اهميت اطلاع دقيق از جهت look است، به طوري كه وجود خطا در اين آگاهي سبب مي‌شود با منبع مطلوب، مانندinterference رفتار شده در نتيجه سيگنال مطلوب تضعيف گردد. ميزان تضعيف، وابسته به توان سيگنال و ميزان خطاست و با افزايش اين دو پارامتر افزايش مي‌يابد. راه حل اين مشكل پهن(broad)كردن بيم اصلي آرايه است كه مثلاً با افزودن قيد صفر بودن مشتق در جهت look حاصل مي‌شود. در مواردي كه نخواهيم بيم را پهن كنيم، مثلاً به دليل امكان وجود interference قوي در محدوده ي بيم، روشهايي براي تعيين جهت رسيدن سيگنال (direction of arrival (DOA)) با دقت زياد به كار مي‌رودكه نسبت به روش های معمول که به این منظور به کار می روند، پیچیدگی بیشتری دارند.

به طور كلي در زمينه‌ي اين نوع از خطا پردازنده‌هاي beam-space بهتر از بيم فرمرهاي element-space عمل مي‌كنند كه در اين زمينه در بخش پردازنده های beam-space توضيح داده شد.

۲.۴. خطا در آگاهی از محل المان های آرایه واثر خرابی المان ها

وجود خطا در آگاهی ما از محل دقيق المان های آرایه، سبب تضعيف عملكرد بيم فرمر به خصوص در حالت مقيد (constrained) مي‌شود. از جمله دلايل اين امر خطاي ايجاد شده در $\underset{-0}{s}$ است. به طور كلي اثر اين خطا، ايجاد پترني شبيه پترن يك تك المان به همراه پترن مطلوب آرايه مي‌باشد.

خرابي المانهاي آرايه سبب افزايش سطح لبهاي فرعي و دور شدن وزنها از حالت بهينه مي‌گردد. در اين حالت بايد با شناسايي المانهاي خراب، وزنهاي بهينه مجدداً محاسبه گردند.

۳.۴. خطا در وزن های آرایه

دامنه و فاز وزنها تحت تأثير عوامل مختلفي در مراحل مختلف يك سيستم، دچار خطا مي‌شوند (يعني از حالت بهينه فاصله مي‌گيرند) كه برخي از اين عوامل عبارتند از:

۱) موج رسيده به آرايه واقعاً صفحه اي نباشد، در حالي كه وزنها با فرض صفحه‌اي بودن موج بهينه شده اند.

۲) خطا در اطلاعات مربوط به مكان و ويژگيهاي المانها ی آرايه كه در محاسبه وزنها به كار مي‌رود.

۳) خطا در تخمين ما از ماتريس R (ناشي از متوسط گيري روي تعداد محدودي نمونه از سيگنالها و نيز محدود بودن طول كلمات در محاسبات رياضي)

۴) خطا در بردارهاي $\underset{-i}{s}$ يا سيگنال مرجع كه در محاسبه وزنها به كار مي‌روند.

۵) خطاي محاسباتي ناشي از داشتن دقت محدود در عمل

۶) خطاي كوانتيزه كردن، ناشي از تبديل وزنها از آنالوگ به ديجيتال براي ذخيره سازي

۷) خطاي پياده سازي ناشي از خطاي تقويت كننده‌ها و phase-shifter ها كه براي پياده‌سازي بهره و فاز به كار مي‌روند.

با مدل كردن خطاي وزنها به صورت نوسانات تصادفي در وزنها يا مدل كردن آن با خطاي دامنه و خطاي فاز، اثر اين خطا روي گين آرايه، كاهش عمق null هاي پترن، كاهش قابليت interference-rejection ، تغيير سطح لبهاي فرعي و ... مورد بررسي قرار گرفته است. گين آرايه (نسبت SNR خروجي به SNR ورودي) در اثر اين خطا كاهش مي‌يابد. ميزان اين كاهش، به تعداد المانهاي آرايه و گين آرايه در غياب خطا، حساس است. به طوري كه براي يك

آرایه با تعداد المان زیاد وگین زیاد در غیاب خطا، خطاي نسبتاً زيادي در وزنها مي‌تواند گین آرایه را به ۱ کاهش دهد.

فاز وزنها هم پارامتر مهمي است که ایجاد خطا در آن، مثلاً در هنگامي كه از آرايه براي تشخيص DOA استفاده مي‌شود، مي‌تواند سبب ایجاد خطا در DOA تعیین شده شود.

يكي از پارامترهايي که طراح آرایه باید در نظر داشته باشد، خطاي RMS فاز است.

نشان داده شده است كه خطاي RMS فاز، سبب تضعيف سیگنال مطلوب در بیم فرمر بهینه‌ي مقید مي‌شود و میزان این تضعيف متناسب با حاصل ضرب توان سیگنال در واریانس این خطای تصادفي مي‌باشد.

به عنوان نمونه يكي از خطاهاي phase-shifter خطاي كوانتيزاسيون است. يك phase-shifter p بيتي كوچكترين فاز قابل تغيير $\frac{2\pi}{2^p}$ است. با فرض توزيع يكنواخت خطا بين $-\frac{\pi}{2^p}$ و $\frac{\pi}{2^p}$، واريانس این خطا برابر $\frac{\pi^2}{3\times 2^{2p}}$ است.

۵. نتیجه گیری

آنتن هاي هوشمند با استفاده از روش هاي پردازش آرايه، نقش مهمي در برآوردن تقاضاهاي روز افزون براي سرويس هاي مخابرات بي سيم ايفا مي كنند.در اين راستا، يكي از قابليت هاي مهم آنتن هاي هوشمند شكل دادن به بيم (beam-forming) است.

در این مقاله به معرفي روش هاي مختلف شكل دادن به بيم پرداختیم و به محاسن، معايب وموارد استفاده ي هر یک اشاره كرديم. همچنين به بررسي چند الگوريتم adaptive براي بيم فرمينگ پرداختيم و ديديم كه اين الگوريتم ها طي چند مرحله تكرار ما را به تخميني از پاسخ ايده آل ميرسانند.در اين زمينه به عوامل موثر در سرعت اين الگوريتم ها اشاره كرديم و ديديم چگونه خواسته ها و نيازهاي ما در سيستم در انتخاب اين عوامل اثر مي گذارد .همچنين اثر وجود شرايط غير ايده آل بر عملكرد بيم فرمر بررسي شد.

مراجع :

[1] L. C. Godara, “Application of antenna arrays to mobile communications, part II: beam-forming and direction of arrival considerations,” *proc. IEEE,* vol. 85, pp. 1195-1245, 1997.

[2] B. D. Van Veen and K. M. Buckley, ”Beamforming: a versatile approach to spatial filtering,” *IEEE ASSP Mag*., pp. 4-24, April 1988.

[3] M. Ghavami, “Wideband smart antenna theory using rectangular array structures,” *IEEE Trans. Signal Processing,* vol. 50, pp. 2143-2151, 2002.

[4] C. B. Dietrich, W. L. Stutzman, B. Kim and K. Dietze, “Smart antennas in wireless communications: base-station diversity and handset beamforming,” *IEEE Antennas and Propagation Mag.,* pp. 142-151, October 2000.

[5] S. Bellofiore, J. Foutz, C. A. Balanis and A. S. Spanias, “Smart antenna system for mobile communication networks, part 2: beamforming and network throughput,” *IEEE Antennas and Propagation Mag.,* pp. 106-114, August 2002.