

# بهبود کارآیی سیستم UWB مبتنی بر TiR در شرایط تخمینگر غیر ایده آل کانال

سجاد علیزاده<sup>۱</sup> حسین خالقی بیزکی<sup>۲</sup> مجید اخوت<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق (مخابرات سیستم)- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه یزد- یزد- ایران

[s.alizadeh@stu.yazd.ac.ir](mailto:s.alizadeh@stu.yazd.ac.ir)

۲- استادیار دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران- ایران

[bizaki@ee.iust.ac.ir](mailto:bizaki@ee.iust.ac.ir)

۳- استادیار دانشکده مهندسی برق - دانشگاه امام حسین (ع)- تهران- ایران

[mokhovvat@ihu.ac.ir](mailto:mokhovvat@ihu.ac.ir)

**چکیده:** هدف از این مقاله، بهبود عملکرد یک سیستم ارسال UWB مبتنی بر TiR در شرایط تخمینگر غیر ایده آل کانال می باشد. تکنیک TiR، یک روش موثر و ساده برای ارسال - دریافت در کانال های با چند مسیریگی می باشد که پیچیدگی گیرنده را کاهش می دهد، اما این روش به خطای ناشی از تخمین غیر ایده آل کانال حساس می باشد. بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه نیز با فرض یک تخمینگر ایده آل کانال انجام گرفته است. در این مقاله با فرض داشتن کواریانس خطای تخمین کانال توانسته ایم یک پیش فیلتر TiR بهبود یافته طراحی نماییم. با تحلیل اثبات خواهد شد که طراحی این پیش فیلتر جبران شده به کواریانس خطای تخمین کانال وابسته می باشد. همچنین بهبود عملکرد روش پیشنهاد شده با حفظ ویژگی تمرکز زمانی تکنیک TiR با کمک شبیه سازی در کانال های کاربردی UWB نشان داده می شود.

**کلمات کلیدی:** تمرکز زمانی، تکنیک TiR، چند مسیریگی و سیستم های UWB.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۹/۱۰/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۳/۳۰

نام نویسنده ی مسئول: سجاد علیزاده

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - یزد - صفاییه - بلوار دانشگاه - دانشگاه یزد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

برای ارسال اطلاعات با نرخ بالا در فواصل کوتاه، یکی از گزینه‌ها استفاده از سیستم‌های باند فوق وسیع (UWB) می‌باشد. در این سیستم‌ها از پالس‌های بسیار باریک در حوزه زمان برای ارسال اطلاعات استفاده می‌شود، که باعث تفکیک پذیری زمانی بالای سیگنال دریافتی و ایجاد تداخل بین سمبلی (ISI) می‌گردد. یکی از راه‌حل‌ها برای غلبه بر ISI استفاده از اکولایزر می‌باشد. برای کاهش پردازش اکولایزر می‌توان از روش معکوس زمانی استفاده کرد. تکنیک معکوس زمانی (به اختصار TiR می‌نامیم) یک روش ساده ارسال و دریافت است که منجر به کاهش پیچیدگی در طراحی فرستنده-گیرنده‌های UWB می‌شود. در این روش، سیگنال در فرستنده، ابتدا پیش‌فیلتر شده و سپس روی کانال ارسال می‌گردد که باعث می‌شود که آن سیگنال در گیرنده مورد نظر در فضا و زمان متمرکز شود [۱]. تمرکز زمانی باعث کاهش اثر تداخل بین سمبلی و تمرکز فضایی باعث امنیت ارسال و کاهش اثر تداخلی روی فرستنده-گیرنده‌های مجاور می‌گردد. پاسخ ضربه پیش‌فیلتر، حاصل معکوس زمانی و مزدوج مختلط شده پاسخ ضربه کانال می‌باشد که طی سناریوی تخمین کانال بدست می‌آید. بدیهی است که وجود خطا در تخمین گر کانال روی عملکرد روش TiR اثر نامطلوبی دارد. در مرجع [۲]، عملکرد تکنیک TiR با اکولایزر MMSE با فرض کامل بودن تخمین کانال مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مقاله سعی کرده ایم که این کار را با فرض وجود تخمینگر غیر ایده آل کانال و استفاده از تخمینگر MMSE بهینه به عنوان گیرنده به جای اکولایزر انجام دهیم. بنابراین، در بخش ۲ به تحلیل و ارائه روش پیشنهادی در حضور خطای تخمین کانال پرداخته ایم. شبیه سازی در بخش ۳ بیان شده است و بخش ۴ شامل نتیجه گیری می‌باشد.

## ۲- معرفی سیستم پیشنهادی

در این بخش به تحلیل اثر خطای تخمین کانال روی تکنیک TiR و نحوه جبران سازی آن در پیش‌فیلتر فرستنده می‌پردازیم.

### ۲-۱- تکنیک TiR در شرایط تخمینگر غیر ایده آل کانال

در تکنیک TiR ابتدا پاسخ کانال تخمین زده شده و سپس از معکوس زمانی و مزدوج مختلط شده آن به عنوان پاسخ ضربه پیش‌فیلتر در فرستنده استفاده می‌شود. اگر  $h(\tau)$  پاسخ ضربه کانال مذکور باشد، گیرنده، پاسخ  $\hat{h}(\tau)$  را تخمین زده و فرستنده از معکوس زمانی شده آن استفاده می‌کند. در این مقاله برای تخمین ضرائب کانال از

الگوریتم CLEAN استفاده می‌کنیم [۳] که مبتنی بر ML می‌باشد. بنابراین پاسخ ضربه معادل یک سیستم TiR بصورت زیر می‌باشد:

$$h_{TiR}(\tau) = \hat{h}^*(-\tau) \otimes h(\tau) \quad (1)$$

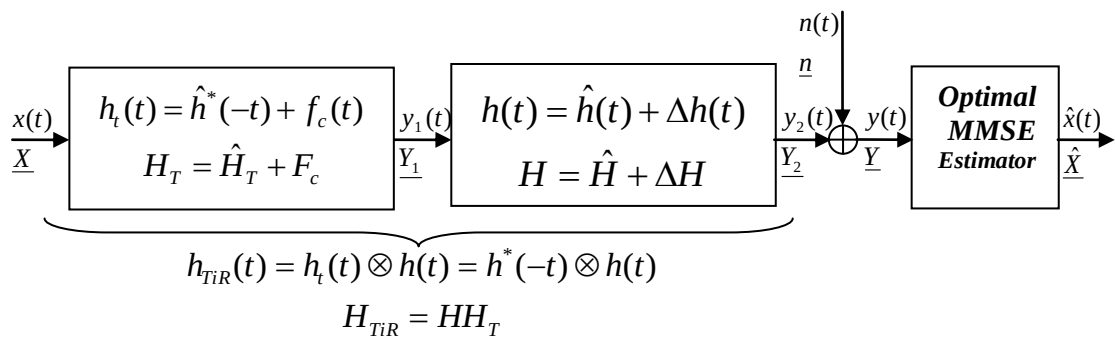
که  $\hat{h}^*(-\tau)$  پاسخ ضربه پیش‌فیلتر مورد استفاده در فرستنده و  $h(\tau)$  پاسخ ضربه کانال UWB و  $\otimes$  نشان دهنده کانوالوشن نسبت به متغیر تأخیر  $\tau$  می‌باشد. از طرفی تابع خود همبستگی پاسخ ضربه کانال بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{hh}(\tau) = h^*(-\tau) \otimes h(\tau) \quad (2)$$

در نتیجه داریم:  $h_{TiR}(\tau) \cong R_{hh}(\tau)$  در بخش بعد می‌خواهیم که پاسخ معادل TiR را به تابع خود همبستگی پاسخ ضربه کانال نزدیک کنیم. بهترین عملکرد و تمرکز زمانی روش TiR زمانی است که نامساوی بالا به مساوی تبدیل شود.

### ۲-۲- تحلیل و نحوه جبران سازی خطای تخمین کانال

بلوک دیاگرام طرح جبران سازی در شکل ۱ نشان داده شده است. یک کانال چند مسیره با مدل TDL با  $L_1$  مسیر یا تپ را در نظر می‌گیریم که فاصله تپ‌ها از هم یکنواخت بوده و به اندازه یک سمبل ارسالی می‌باشد. تعداد سمبل‌های ارسالی را  $N$  در نظر می‌گیریم.  $\underline{X}$  بردار سمبل ارسالی با مولفه‌های  $\{\pm 1\}$  (مدولاسیون BPSK)،  $H_{TiR}$  شکل ماتریسی پاسخ معادل TiR که شکل زمانی آن  $h_{TiR}(t) = h^*(-t) \otimes h(t)$  می‌باشد.  $h(t)$  و  $h^*(-t)$  هر کدام دارای  $L_1$  تپ و  $h_{TiR}(t)$  دارای  $L = 2L_1 - 1$  تپ می‌باشد.  $h(t)$  پاسخ ضربه کانال به طول  $L_1$ ،  $h_t(t)$  پاسخ ضربه پیش‌فیلتر در فرستنده به طول  $L_1$ ،  $h_{TiR}(t)$  پاسخ ضربه معادل TiR به طول  $L = 2L_1 - 1$ ،  $x(t)$  سیگنال مدوله شده BPSK و  $\hat{x}(t)$  سیگنال خروجی تخمینگر MMSE یا سیگنال آشکار شده می‌باشد. ضرائب کانال را در طول یک برست داده، ایستا در نظر می‌گیریم. در تحلیل‌های این مقاله از فرم نمایش ماتریسی استفاده شده است که در اینجا معرفی می‌گردد. مجموعه ماتریس‌های  $(H, \hat{H}, \Delta H)$ ،  $(H_T, \hat{H}_T, F_c)$  و نیز ماتریس  $H_{TiR}$  به ترتیب دارای ابعاد  $((N+L-1) \times (N+L_1-1))$ ،  $((N+L-1) \times N)$  و  $((N+L_1-1) \times N)$  هستند. همچنین بردارهای  $(\underline{X}, \underline{\hat{X}})$ ،  $(\underline{Y}, \underline{\hat{Y}})$  و  $(\underline{n}, \underline{\hat{n}})$  به ترتیب دارای ابعاد  $((N \times 1)$ ،  $((N+L-1) \times 1)$  و  $((N+L_1-1) \times 1)$  می‌باشند. هدف بدست آوردن ماتریس جبران ساز  $F_c$  بصورت تابعی از  $\hat{H}$  یا  $\hat{H}_T$  و  $C_{\Delta H}$  می‌باشد یعنی  $F_c = g(\hat{H}, C_{\Delta H})$ ، با فرض اینکه  $C_{\Delta H}$  یعنی ماتریس کواریانس خطای تخمین کانال را داشته باشیم



شکل (۱): یک لینک ارتباطی با تخمینگر MMSE بهینه در شرایط تخمینگر غیر ایده آل کانال با اجرای TIR بهبود یافته برای محیط های درون ساختمانی.

که  $C_{\Delta H} = E\{\Delta H^H \Delta H\}$  فرض می کنیم که سیگنال ورودی به تخمینگر MMSE بهینه بصورت زیر باشد:

$$\underline{e} = \hat{\underline{X}} - \underline{X} \quad (۷)$$

برای محاسبه ماتریس جبران ساز  $F_c$  بر اساس معیار MMSE، بایستی متوسط مربع بردار خطا را مینیمم کنیم:

$$F_c = \arg \min_{\tilde{F}_c} E\{\|\underline{e}\|^2\} \quad (۸)$$

اما ساده تر است که از اصل تعامد استفاده کنیم [۴]. براساس اصل تعامد، بردار خطا بایستی بر بردار داده های مشاهده شده ( بردار سمبل های آشکار شده  $\hat{\underline{X}}$  ) عمود باشد یعنی:

$$E\{\underline{e} \hat{\underline{X}}^H\} = 0 \Rightarrow F_c = g(\hat{H}, C_{\Delta H})$$

که به نتیجه زیر منجر می شود:

$$\begin{aligned} E\{(\hat{\underline{X}} - \underline{X}) \hat{\underline{X}}^H\} &= 0 \\ E\{\hat{\underline{X}} \hat{\underline{X}}^H\} &= E\{\underline{X} \underline{X}^H\} \end{aligned} \quad (۹)$$

و اما بردار های به کار رفته در تحلیل ها را بصورت زیر نمایش می دهیم:

$$\begin{aligned} \underline{X} &= \begin{bmatrix} x[0] \\ \vdots \\ x[N-1] \end{bmatrix}, \quad \hat{\underline{X}} = \begin{bmatrix} \hat{x}[0] \\ \vdots \\ \hat{x}[N-1] \end{bmatrix} \\ \underline{Y}_1 &= \begin{bmatrix} y_1[0] \\ \vdots \\ y_1[N+L_1-2] \end{bmatrix}, \quad \underline{Y}_2 = \begin{bmatrix} y_2[0] \\ \vdots \\ y_2[N+L-2] \end{bmatrix} \\ \underline{Y} &= \begin{bmatrix} y[0] \\ \vdots \\ y[N+L-2] \end{bmatrix}, \quad \underline{n} = \begin{bmatrix} n[0] \\ \vdots \\ n[N+L-2] \end{bmatrix} \end{aligned}$$

و همچنین ماتریس های به کار رفته در تحلیل ها بصورت زیر قابل نمایش هستند:

$$H = \begin{bmatrix} h[0] & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ h[L_1-1] & & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & & h[0] \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h[L_1-1] \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} y[l] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] h_{TIR}[l-k] + n[l] \\ l = 0, \dots, N+L-2 \end{cases} \quad (۳)$$

اگر طبق تعریف:

$$\begin{aligned} h_t &= [h_t[0], \dots, h_t[L_1-1]]^T \\ \underline{Y}_1 &= [y_1[0], \dots, y_1[N+L_1-2]]^T \\ \underline{X} &= [x[0], \dots, x[N-1]]^T \rightarrow \begin{cases} x[k] = \{\pm 1\} \\ k = 0, \dots, N-1 \end{cases} \end{aligned}$$

آنگاه خواهیم داشت:

$$\begin{cases} y_1[m] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] h_t[m-k] \\ m = 0, \dots, N+L_1-2 \end{cases} \quad (۴)$$

همچنین اگر داشته باشیم:

$$\begin{aligned} h &= [h[0], \dots, h[L_1-1]]^T \\ \underline{Y}_2 &= [y_2[0], \dots, y_2[N+L-2]]^T \\ \underline{Y}_1 &= [y_1[0], \dots, y_1[N+L_1-2]]^T \end{aligned}$$

آنگاه رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$\begin{cases} y_2[n] = \sum_{m=0}^{N+L_1-2} y_1[m] h[n-m] \\ n = 0, \dots, N+L-2 \end{cases} \quad (۵)$$

اگر این روابط کانوالوشن را بصورت برداری بنویسیم در حوزه ماتریس به روابط زیر خواهیم رسید که در تحلیل ها از آنها استفاده می کنیم:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_1 &= H_T \underline{X} \\ \underline{Y}_2 &= H \underline{Y}_1 \end{aligned} \quad (۶)$$

$$\underline{Y} = \underline{Y}_2 + \underline{n} = H H_T \underline{X} + \underline{n} = H_{TIR} \underline{X} + \underline{n}$$

بردار خطا را بصورت تفاضل سمبل های ارسالی و سمبل های آشکار شده (مشاهده شده) به شکل زیر می توان نشان داد:

$$\hat{H}_{TIR} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{TIR}[0] & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ \hat{h}_{TIR}[L-1] & & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \hat{h}_{TIR}[0] \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \hat{h}_{TIR}[L-1] \end{bmatrix}$$

که در آن:  $H_{TIR} = HH_T$  و  $\hat{H}_{TIR} = \hat{H}\hat{H}_T$ . سیگنال دریافتی در گیرنده بصورت  $\underline{Y} = H_{TIR}\underline{X} + \underline{n}$  می باشد که در آن مولفه های نویز مستقل بوده، دارای متوسط صفر  $E\{\underline{n}\} = 0$  و واریانس  $E\{\underline{n}\underline{n}^H\} = \sigma_n^2 I = N_0 I$  می باشند. همچنین بردار سمبل های  $\underline{X}$ ، متغیرهای تصادفی iid با متوسط صفر  $E\{\underline{X}\} = 0$  و واریانس  $E\{\underline{X}\underline{X}^H\} = \sigma_X^2 I$  فرض می شود. از مراجع  $[\Delta]$  و  $[6]$ ، خروجی یک تخمینگر MMSE بهینه بصورت  $\hat{\underline{X}} = (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} H_{TIR}^H \underline{Y} + N_0 I$  بدست می آید. با جایگذاری بردار دریافتی  $\underline{Y} = H_{TIR}\underline{X} + \underline{n}$  داریم:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{X}} &= \underline{X} + (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} H_{TIR}^H \underline{n} + N_0 I \\ \hat{\underline{X}}^H &= \underline{X}^H + \underline{n}^H H_{TIR} (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} + N_0 I \end{aligned} \quad (10)$$

طبق اصل تعامد که  $E\{\hat{\underline{X}}\hat{\underline{X}}^H\} = E\{\underline{X}\underline{X}^H\}$  می باشد و همچنین با استفاده از فرضیات بیان شده (برای توضیحات بیشتر به پیوست مراجعه شود) به رابطه زیر می رسیم:

$$H_T^H (C_{\Delta H} + \hat{H}^H \hat{H}) H_T = -\frac{1}{N_0} I_{N \times N} \quad (11)$$

که  $H = \hat{H} + \Delta H$  و  $H_T = \hat{H}_T + F_c$  می باشد. در اینجا  $\hat{H}$ ،  $C_{\Delta H} = E\{\Delta H^H \Delta H\}$  و  $\hat{H}_T$  که به  $\hat{H}$  وابسته است جزء معلومات مساله و ماتریس  $F_c$  و در نتیجه  $H_T$  جزء مجهولات بوده که هدف یافتن  $F_c$  بر حسب  $C_{\Delta H} = E\{\Delta H^H \Delta H\}$  و  $\hat{H}$  یا  $\hat{H}_T$  می باشد.  $C_{\Delta H}$  ماتریسی مربعی با ابعاد  $(N + L_1 - 1) \times (N + L_1 - 1)$  می باشد از طرفی  $\Delta H$  مستقل از  $\hat{H}$  بوده و دارای متوسط صفر ( $E\{\Delta H\} = 0$ ) می باشد. اگر  $B^H = B$  و با دانستن این مساله که  $B = -N_0 (C_{\Delta H} + \hat{H}^H \hat{H})$  یعنی ماتریسی مربعی با تقارن هرمیتینی، آنگاه داریم:

$$H_T^H B H_T = I \Rightarrow H_T H_T^H = B^{-1} \quad (12)$$

اگر طبق تعریف:  $B^{-1} = R = [r_{ij}]_{(N+L_1-1) \times (N+L_1-1)}$ ، باشد، آنگاه با مساوی قرار دادن درایه های قطر اصلی دو طرف معادله (12)، به جواب خواهیم رسید. در این صورت مولفه های ماتریس پیش فیلتر

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} \hat{h}[0] & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ \hat{h}[L_1-1] & & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \hat{h}[0] \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \hat{h}[L_1-1] \end{bmatrix}$$

$$\Delta H = \begin{bmatrix} \Delta h[0] & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ \Delta h[L_1-1] & & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \Delta h[0] \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \Delta h[L_1-1] \end{bmatrix}$$

$$H_T = \begin{bmatrix} h_t[0] & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ h_t[L_1-1] & & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & h_t[0] \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & h_t[L_1-1] \end{bmatrix}$$

$$\hat{H}_T = \begin{bmatrix} \hat{h}^*[L_1-1] & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ \hat{h}^*[0] & & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & \hat{h}^*[L_1-1] \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \hat{h}^*[0] \end{bmatrix}$$

$$F_c = \begin{bmatrix} f_c[0] & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ f_c[L_1-1] & & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & f_c[0] \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & f_c[L_1-1] \end{bmatrix}$$

$$H_{TIR} = \begin{bmatrix} h_{TIR}[0] & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ h_{TIR}[L-1] & & \ddots & 0 \\ 0 & & \ddots & h_{TIR}[0] \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & h_{TIR}[L-1] \end{bmatrix}$$

بصورت زیر بدست می آیند:

$$\begin{cases} h_t[0] = \pm\sqrt{r_{11}} \\ h_t[1] = \pm\sqrt{r_{22} - h_t^2[0]} \\ \vdots \\ h_t[L_1 - 1] = \pm\sqrt{r_{L_1 L_1} - (h_t^2[0] + \dots + h_t^2[L_1 - 2])} \end{cases}$$

انتخاب علامت مثبت یا منفی، بستگی به مثبت یا منفی بودن تپ مورد نظر کانال دارد که از چک کردن علامت تپ های تخمین زده شده ( $\hat{H}$ ) معلوم می شود.

از طرفی داریم:

$$\begin{cases} h_t[0] = h^*[L_1 - 1] = \hat{h}^*[L_1 - 1] + f_c[0] \\ h_t[1] = h^*[L_1 - 2] = \hat{h}^*[L_1 - 2] + f_c[1] \\ \vdots \\ h_t[L_1 - 1] = h^*[0] = \hat{h}^*[0] + f_c[L_1 - 1] \end{cases}$$

در نتیجه درایه های ماتریس جبران ساز  $F_c$  بصورت زیر بدست می آیند:

$$\begin{cases} f_c[0] = \pm\sqrt{r_{11} - \hat{h}^*[L_1 - 1]} \\ f_c[1] = \pm\sqrt{r_{22} - h_t^2[0] - \hat{h}^*[L_1 - 2]} \\ \vdots \\ f_c[L_1 - 1] = \pm\sqrt{r_{L_1 L_1} - (h_t^2[0] + \dots + h_t^2[L_1 - 2]) - \hat{h}^*[0]} \end{cases} \quad (13)$$

### ۳- نتایج شبیه سازی

در این بخش به کمک شبیه سازی، الگوریتم پیشنهادی را بر اساس شکل ۱ در شرایط مختلف کانال مورد بررسی و ارزیابی قرار می دهیم. در شبیه سازی ابتدا از یک کانال مدل TDL با  $L_1 = 15$  تپ به عنوان کانال چند مسیره استفاده می نماییم (شکل ۲). ابتدا بدون اعمال روش TiR با الگوریتم CLEAN پاسخ ضربه کانال را تخمین می زنیم. سپس روش TiR را با کمک پاسخ ضربه تخمین زده شده روی کانال ذکر شده پیاده سازی کرده و سمبل های مدوله شده BPSK را بصورت بلوکی روی کانال TiR مذکور ارسال می کنیم. با کمک روش جبران سازی در سناریوی دیگری، پیش فیلتر فرستنده را بهینه کرده و روش TiR را در این حالت پیاده سازی می کنیم. مشاهده می گردد که عملکرد سیستم در حالت جبران شده، بهبود یافته (شکل ۳)، بطوریکه ویژگی تمرکز زمانی روش TiR تقریباً حفظ شده است (شکل ۴). همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، الگوریتم پیشنهادی در احتمال خطای 0.001، عملکرد سیستم را حدود 4dB بهبود داده است.

سپس برای بررسی و تست الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی در مدل های استاندارد کانال UWB با واریانس های مختلف خطای تخمین کانال (همان مولفه های  $C_{AH}$ )، از دو مدل کاربردی و عملی کانال چندمسیره در سیستم های TiR-UWB یعنی CM1 و CM4 [۷] استفاده می کنیم. بر خلاف حالت قبل که از الگوریتم CLEAN برای تخمین کانال استفاده نمودیم، در این حالت فرض می کنیم که کانال با تخمینگر مفروضی که ماتریس کواریانس آن ( $C_{AH}$ ) موجود است، تخمین زده می شود. خطای این تخمینگر، گاوسی فرض می شود. چون در تحلیل ها، متوسط خطای تخمینگر کانال را صفر در نظر گرفته ایم، بنابراین مولفه های ماتریس  $C_{AH}$  همان واریانس خطای تخمینگر کانال می باشند. برای ارسال اطلاعات در چنین کانال هایی نیاز به یک پالس بسیار باریک در حوزه زمان داریم و مشخصات زمانی آن را طوری تنظیم می کنیم که منطبق بر قوانین FCC باشد. در اکثر کاربرد های عملی از مشتق دوم پالس گاوسی (شکل ۵) برای ارسال اطلاعات استفاده می شود که دارای رابطه زیر می باشد [۵]:

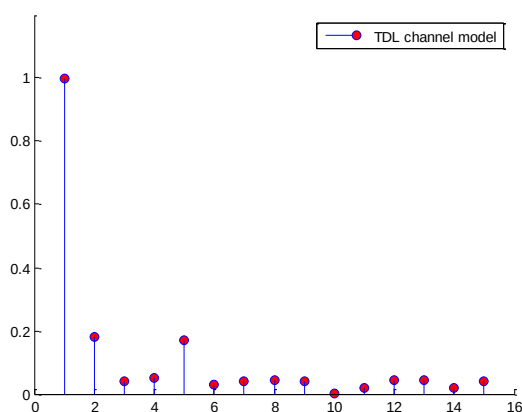
$$p(t) = A(1 - 4\pi(\frac{t}{\delta})^2) \exp(-2\pi(\frac{t}{\delta})^2) \quad (14)$$

که برای بدست آوردن پهنای پالس  $T_p = 1nsec$ ، مقدار  $\delta = 0.48nsec$  قرار می دهیم که این مقدار با تجربه بدست می آید. اگر از مدولاسیون BPAM استفاده شود آنگاه برای سیگنال مدوله شده داریم [۵]:

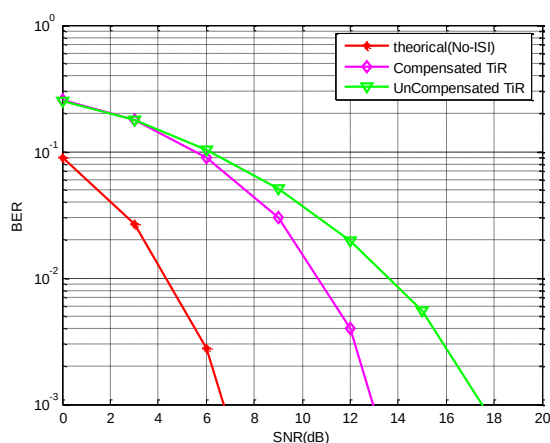
$$s(t) = \sum_{j=1}^N d_j p(t - jT_f) \quad (15)$$

که در آن،  $s(t)$  سیگنال مدوله شده،  $N$  تعداد سمبل ها (بیت ها)،  $T_f$  پریود تکرار سمبل ها،  $d_j$  بیانگر سمبل  $j$  ام که داریم:  $d_j = \{\pm 1\}$ ,  $j = 1, \dots, N$  که برای بیت "1" و -1 برای بیت "0" می باشد. هر چه  $T_f$  کوچکتر باشد، ارسال با سرعت بیشتری انجام می شود اما اگر  $T_f < T_d$  (گسترش تاخیر کانال با طول کانال) باشد، ISI خواهیم داشت. البته این شرایط برای  $T_p < T_d$  هم رخ خواهد داد. همچنین زمان نمونه برداری  $T_s = 0.1nsec$  می باشد. پریود تکرار سمبل ها را  $T_f = 2nsec$  انتخاب کرده ایم و هر بیت با ۱۰ نمونه  $10 \times 0.1nsec = 1nsec$  ارسال می شود. در این مقاله از مدل های کانال مصوب برای کاربرد های درون ساختمانی با نام های CM1 و CM4 که به ترتیب بهترین و بدترین رفتار را در بین مدل های عملی پیشنهادی IEEE 802.15.3a داشته اند، استفاده می کنیم [۷]. این مدل ها به همراه پروفایل تاخیر توان شان در شکل های ۶ و ۷ رسم گردیده اند. همچنین مشخصات آنها در جدول ۱ لیست شده است.

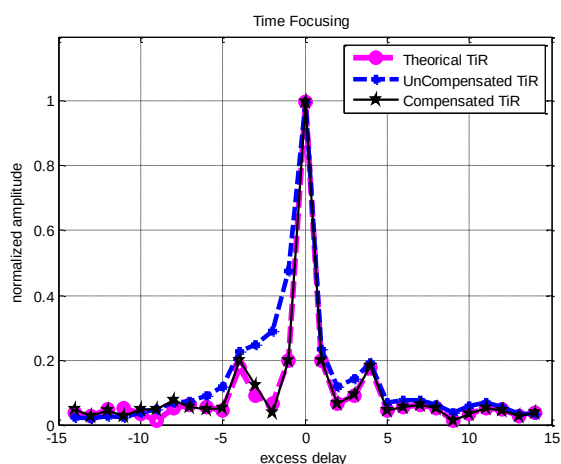
تقریباً 4dB بهبود می یابد.



شکل (۲): کانال چند مسیره با مدل TDL شامل ۱۵ تپ



شکل (۳): مقایسه عملکرد سیستم ارسال TiR در دو حالت پیش فیلتر بهینه شده و پیش فیلتر مبتنی بر تخمین غیر ایده آل.



شکل (۴): مقایسه تمرکز زمانی روش TiR بهبود یافته و روش TiR با حضور خطای تخمین کانال.

جدول ۱: مشخصات کانال های استفاده شده [۷]

| مشخصات                  | CM1    | CM4     |
|-------------------------|--------|---------|
| گسترش تاخیر موثر (nsec) | ۵      | ۲۵      |
| تعداد مسیر های موثر     | ۲۱     | ۱۲۰     |
| فاصله ارسال - دریافت    | 0 - 4m | 4 - 10m |
| Line Of Sight           | دارد   | ندارد   |

معادله چنین کانال هایی معمولاً بصورت مدل TDL زیر بیان می شوند [۵]:

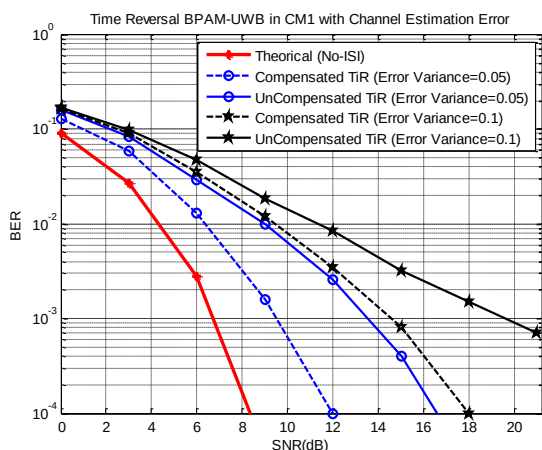
$$h(t) = \sum_{n=1}^{N_{Path}} a_n \delta(t - \tau_n) \quad (۱۶)$$

که در آن،  $N_{Path}$  تعداد مسیر های موثر کانال،  $\{a_n\}$  بهره های کانال و  $\{\tau_n\}$  تاخیر های متناظر آنها می باشند. در اینجا فرض می کنیم که  $N_{Path}$  مسیر کانال را می توانیم با خطاهای مفروض، تخمین بزنیم. تعداد مسیر های موثر ذکر شده در جدول ۱ شامل ۸۵ درصد انرژی کل کانال هستند.

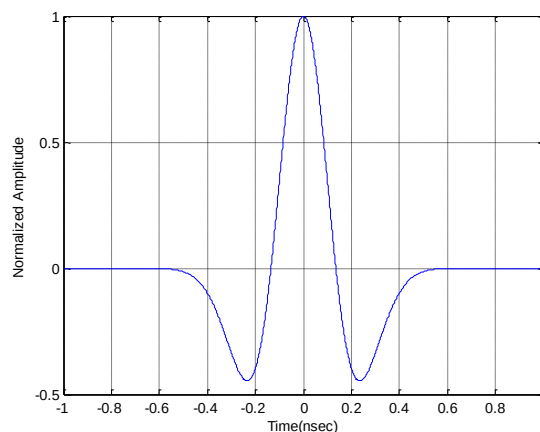
مطابق گام اول شبیه سازی، عملکرد الگوریتم پیشنهادی را با ترسیم نمودار احتمال خطای بیت سیستم TiR-UWB در واریانس های مختلف خطای تخمین کانال (0.05 و 0.1) بررسی می نماییم. نتیجه این بررسی در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، احتمال خطای بیت سیستم مذکور، به واسطه استفاده از الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی در مدل کانال CM1، در دو واریانس خطای تخمین کانال 0.05 و 0.1 کاهش قابل ملاحظه ای کرده و در نتیجه، عملکرد سیستم بهبود یافته است. همین نتیجه در مورد مدل کانال CM4 در شکل ۹ نیز قابل مشاهده می باشد. همچنین، همانگونه که در شکل های ۸ و ۹ ملاحظه می گردد، عملکرد سیستم در واریانس های ذکر شده خطای تخمین کانال، در احتمال خطای بیت 0.001 به اندازه تقریباً 4dB بهبود یافته است.

## ۴- نتیجه گیری

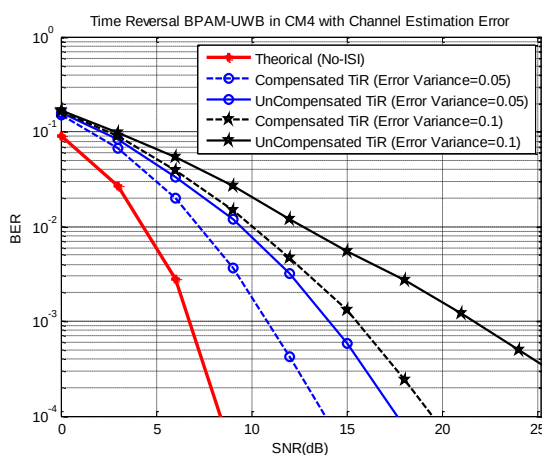
در این مقاله، به بهینه سازی یک پیش فیلتر مبتنی بر TiR در شرایط تخمینگر غیر ایده آل کانال پرداختیم. از طریق تحلیل اثبات شد که با داشتن ماتریس کواریانس خطای تخمین کانال می توان اثر تخریبی خطای تخمینگر را روی عملکرد پیش فیلتر TiR در فرستنده خنثی نمود، طوری که پیش فیلتر جبران شده، تمرکز زمانی تکنیک TiR را خراب نکند. عملکرد روش پیشنهادی در مدل های کاربردی سیستم های UWB در واریانس های مختلف خطای تخمین کانال به کمک شبیه سازی تست و تایید گردید. مشاهده گردید که با الگوریتم پیشنهادی، عملکرد سیستم در احتمال خطای بیت 0.001 به اندازه



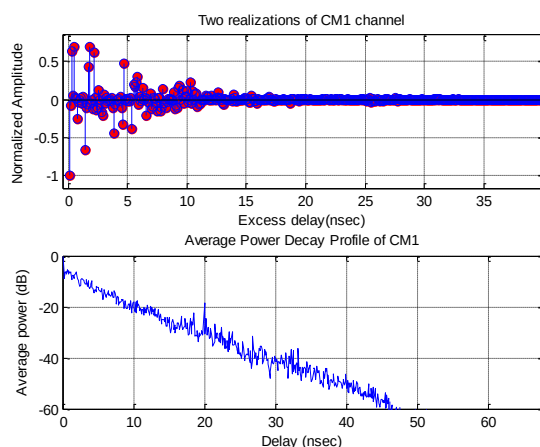
شکل (۸): عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مدل کانال CM1 در شرایط تخمین غیر ایده آل کانال با واریانس های 0.05 و 0.1.



شکل (۵): مشتق دوم پالس گاوسی مورد استفاده در شبیه سازی.



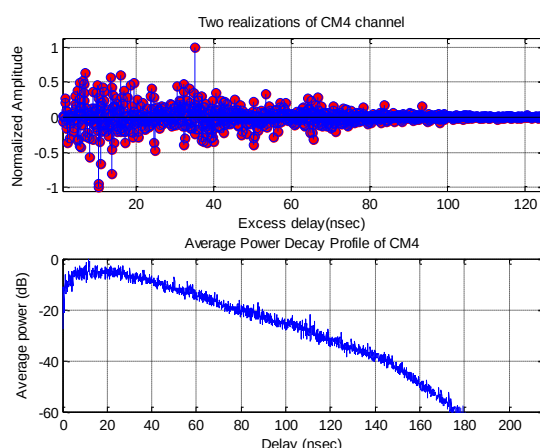
شکل (۹): عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مدل کانال CM4 در شرایط تخمین غیر ایده آل کانال با واریانس های 0.05 و 0.1.



شکل (۶): کانال چند مسیره CM1 به همراه پروفایل تاخیر توان آن.

## مراجع

- [1] Robert c. Qiu, et all, "A Theory of Time-Reversed Impulse Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) for Ultra-Wideband (UWB) Communications", 2006 Int'l Conf. UWB, Waltham, MA, Oct. 2006.
- [2] T. Strohmer, M. Emami, J. Hansen, G. Papanicolaou, and A. J. Paulraj, "Application of time reversal with MMSE equalizer to UWB Communications", Proc. IEEE Global Telecommunications Conference, Dallas, Texas, Nov.29-Dec.3,2004.
- [3] A. Akogun, R. C. Qiu, and N. Guo, "Demonstrating time reversal in ultra-wideband communications using time domain measurements", The Instrumentation, Systems and Automation (ISA), Tennessee, May 2005.
- [4] H. K. Bizaki, and A. Falahati, "Tomlinson-Harashima precoding with imperfect channel side information", The 9<sup>th</sup> Int. Conf. Advanced Communication Technology (ICACT), Korea, Feb.2007, vol.2, pp.1323-1326.
- [5] A. Akogun, "Theory and application time reversal technique to ultra-wideband wireless communication", a thesis for the Degree Master of Science electrical engineering, Tennessee Technological University, August 2005.



شکل (۷): کانال چند مسیره CM4 به همراه پروفایل تاخیر توان آن.



- [6] T. O. Lewis and P. L. Odell, "Estimation in Linear Models", Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1971.
- [7] J. R. Foerster, M. Pendergrass and A. F. Molisch, "A Channel Model for Ultra-wideband Indoor Communication", MERL (Mitsubishi Electric Research Laboratories, Inc.) TR-2003-73, Nov. 2003.

## پیوست:

با جایگذاری بردار دریافتی  $\underline{Y} = H_{TIR} \underline{X} + \underline{n}$  در رابطه خروجی یک تخمینگر MMSE بهینه داریم [۵] و [۶]:

$$\begin{aligned}\hat{\underline{X}} &= (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} H_{TIR}^H (H_{TIR} \underline{X} + \underline{n}) + N_0 I \\ &= (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} H_{TIR}^H H_{TIR} \underline{X} \\ &\quad + (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} H_{TIR}^H \underline{n} + N_0 I\end{aligned}$$

در نتیجه:

$$\hat{\underline{X}} = \underline{X} + (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} H_{TIR}^H \underline{n} + N_0 I$$

برای محاسبه خود همبستگی داده های خروجی تخمینگر MMSE بهینه (داده های مشاهده شده) بصورت زیر عمل می کنیم:

$$\begin{aligned}E\{\hat{\underline{X}} \hat{\underline{X}}^H\} &= E\{\underline{X} \underline{X}^H\} + E\{\underline{X} \underline{n}^H H_{TIR} (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1}\} \\ &\quad + E\{N_0 \underline{X}\} + E\{(H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} H_{TIR}^H \underline{n} \underline{X}^H\} \\ &\quad + E\{(H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} H_{TIR}^H \underline{n} \underline{n}^H H_{TIR} (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1}\} \\ &\quad + E\{N_0 (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1} H_{TIR}^H \underline{n}\} \\ &\quad + E\{N_0 \underline{X}^H\} + E\{N_0 \underline{n}^H H_{TIR} (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1}\} + E\{N_0^2 I\}\end{aligned}$$

با توجه به فرض های گفته شده و ساده سازی خواهیم داشت:

$$E\{\hat{\underline{X}} \hat{\underline{X}}^H\} = \sigma_X^2 I + N_0 E\{(H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1}\} + N_0^2 I$$

از طرفی برای محاسبه همبستگی متقابل بردار سمبل های ارسالی و بردار سمبل های مشاهده شده داریم:

$$\begin{aligned}E\{\underline{X} \hat{\underline{X}}^H\} &= E\{\underline{X} \underline{X}^H\} + E\{\underline{X} \underline{n}^H H_{TIR} (H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1}\} \\ &\quad + E\{N_0 \underline{X}\} = \sigma_X^2 I\end{aligned}$$

طبق اصل تعامد داریم:

$$\begin{aligned}\sigma_X^2 I + N_0 E\{(H_{TIR}^H H_{TIR})^{-1}\} + N_0^2 I &= \sigma_X^2 I \\ E\{H_{TIR}^H H_{TIR}\} &= -\frac{1}{N_0} I\end{aligned} \quad (۱۷)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}H_{TIR} &= H H_T = (\hat{H} + \Delta H)(\hat{H}_T + F_c) \\ &= \hat{H} \hat{H}_T + \hat{H} F_c + \Delta H \hat{H}_T + \Delta H F_c\end{aligned}$$

مفروضات:  $H$  ماتریس واقعی کانال،  $\hat{H}$  ماتریس تخمین زده شده

کانال (معادل ماتریسی  $\hat{h}(t)$ )،  $\Delta H$  خطای تخمین کانال که در اینجا ماتریس کواریانس (یعنی  $C_{\Delta H}$ ) آن را داریم. از طرفی  $\Delta H$  مستقل از  $\hat{H}$  می باشد.  $H_T$  ماتریس پیش فیلتر در فرستنده،  $\hat{H}_T$  پیش فیلتر تخمین زده شده  $TiR$  (معادل ماتریسی  $\hat{h}^*(-t)$ ) و  $F_c$  ماتریس جبران ساز خطای تخمین  $\Delta H$  می باشد.  $F_c$  مجهول بوده و مستقل از  $\hat{H}_T$  فرض می شود. اگر طبق تعریف  $\hat{H}_{TIR} = \hat{H} \hat{H}_T$  باشد که  $\hat{H}_T$  و  $\hat{H}$  ماتریس های معلوم بوده و به هم وابسته اند، آنگاه داریم:

$$H_{TIR} = \hat{H}_{TIR} + \hat{H} F_c + \Delta H \hat{H}_T + \Delta H F_c$$

با جایگذاری این مقدار در رابطه (۱۷) و بسط آن و استفاده از مفروضات و ایستادن ضرائب کانال خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\hat{H}_{TIR}^H \hat{H}_{TIR} + \hat{H}_{TIR}^H \hat{H} F_c + F_c^H \hat{H}^H \hat{H}_{TIR} \\ + F_c^H \hat{H}^H \hat{H} F_c + \hat{H}_T^H C_{\Delta H} \hat{H}_T + \hat{H}_T^H C_{\Delta H} F_c \\ + F_c^H C_{\Delta H} \hat{H}_T + F_c^H C_{\Delta H} F_c = -\frac{1}{N_0} I_{N \times N}\end{aligned}$$

با ساده کردن دو ترم اول سمت چپ معادله بالا به عبارت  $\hat{H}_{TIR}^H \hat{H} (F_c + \hat{H}_T)$ ، همچنین دو ترم دوم به عبارت  $F_c^H \hat{H}^H \hat{H} (F_c + \hat{H}_T)$  و بالاخره چهار ترم بعدی به رابطه  $(F_c + \hat{H}_T)^H C_{\Delta H} (F_c + \hat{H}_T)$  می رسیم. حال اگر سه عبارت بدست آمده را با هم جمع کنیم، عبارت ساده شده  $H_T^H (C_{\Delta H} + \hat{H}^H \hat{H}) H_T = -\frac{1}{N_0} I_{N \times N}$  بدست خواهد آمد. اگر  $B = -N_0 (C_{\Delta H} + \hat{H}^H \hat{H})$  و با دانستن این مساله که  $B^H = B$  یعنی ماتریسی مربعی دارای تقارن هرمیتی می باشد، آنگاه داریم:  $H_T^H B H_T = I$  طرفین معادله را یکبار در  $H_T$  و سپس در  $H_T^H$  ضرب می کنیم در نتیجه داریم:

$$(H_T H_T^H) B (H_T H_T^H) = (H_T H_T^H)$$

$$(H_T H_T^H) B = I \Rightarrow H_T H_T^H = B^{-1}$$

اگر فرض کنیم:  $B^{-1} = R = [r_{ij}]_{(N+L_1-1) \times (N+L_1-1)}$ ، آنگاه با مساوی قرار دادن درایه های قطر اصلی دو طرف معادله بالا، به جواب مورد نظر یعنی رابطه ۱۳ خواهیم رسید.