بررسی اثر تخمینگر کانال MIMO در طراحی پیش‌کدگذار روی شبکه‌های حسگر بی‌سیم

هستی رستمی و ابوالفضل فلاحتی

چکیده: یکی از مهم‌ترین کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم تخمین پدیده ناشناخته می‌باشد. در تخمین توزیع‌شده روی شبکه حسگر بی‌سیم از فعالیت مشارکتی و اطلاعات پراکنده گره‌های حسگرها استفاده می‌شود. طراحی پیش‌کدگذارها در گره‌های حسگر به منظور ارائه تخمینی نزدیک‌تر به مقدار واقعی استفاده می‌شود. مسئله طراحی پیش‌کدگذار یک مسئله بهینه‌سازی است. از آنجایی که کانال در این شبکه‌ها لینک بی‌سیم است که طبیعتی تصادفی دارد لذا فرض دسترس‌بودن اطلاعات کامل کانال در این نوع شبکه‌ها فرض صحیحی به نظر نمی‌رسد. در فرایند طراحی ماتریس‌های پیش‌کدگذار در گره‌های حسگر به اطلاعات کامل کانال نیاز می‌باشد. در این تحقیق اثر تخمین کانال بر فرایند طراحی ماتریس پیش‌کدگذار و تخمین پدیده ناشناخته بررسی می‌شود. در مسئله تخمین کانال از روش تخمین با دنباله آموزشی استفاده می‌شود و کانال با دو معیار LS و MMSE تخمین زده خواهد شد. از آنجایی که توان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم قید اساسی می‌باشد لذا در این بررسی دنباله آموزشی بهینه و پیش‌کدگذار بهینه تحت قید توان طراحی می‌شوند.

کلیدواژه: **پیش‌کدگذار، تخمین توزیع‌شده، تخمین کانال، شبکه‌های حسگر بی‌سیم.**

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم[1] از تعداد زیادی گره حسگر به همراه یک مرکز جمع‌آوری اطلاعات تشکیل شده و این شبکه‌ها به دلیل کاربرد وسیعشان در دیده‌بانی[2] محیط‌هایی چون بدن انسان و جانوران، مکان‌های آلوده به مواد شیمیایی و خطرناک، میدان‌های جنگی، تجسس، مکان‌یابی[3] هدف و ردیابی[4] آن در دهه‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱] و [۲]. شبکه‌های حسگر بی‌سیم معمولاً برای زیر نظر گرفتن تخمین توزیع‌شده[5] [۳] تا [۸] و کشف غیر متمرکز[6] یک پدیده ناشناخته به کار گرفته می‌شوند. در این شبکه‌ها معمولاً حسگرها به طور تصادفی پخش می‌شوند و به همین دلیل اطلاعات حسگرهایی که در حال مشاهده پدیده‌ای هستند همبسته خواهد شد و اگر این اطلاعات بدون هیچ پردازشی به مرکز ادغام ارسال شود اطلاعات اضافی در شبکه گردش می‌یابد که این باعث اتلاف انرژی حسگرها و درگیرکردن پردازنده موجود در حسگرها می‌شود. از طبیعت همبسته اندازه‌گیری‌های حسگرها در شبکه WSN می‌توان در یافتن روشی برای استفاده مؤثر از منابع فیزیکی همانند توان، پهنای باند و غیره استفاده نمود. حسگرها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به سیستم‌های فرستنده، گیرنده و پردازشی ضعیف با باتری‌هایی با انرژی محدود و ابعاد کوچک مجهز شده‌اند که تعویض و شارژ دوباره آنها همواره امکان‌پذیر نیست. در این شبکه حسگرها جهت ردیابی، کشف و یا تخمین پارامتر ناشناخته، اطلاعات اندازه‌گیری شده را از طریق کانال بی‌سیم به مرکز ادغام ارسال می‌کنند. این فعالیت مشارکتی با استفاده از اندازه‌گیری‌های گروهی توسط گره‌های حسگر صورت می‌پذیرد.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌منظور تحت نظر گرفتن پدیده مورد بررسی اطلاعاتی مهم، ضروری و مرتبط با پدیده را اندازه‌گیری می‌کند و از آنجایی که اغلب این شبکه‌ها در فضای آزاد به کار گرفته می‌شوند لذا کانال میان حسگر و مرکز ادغام کانال بی‌سیم می‌باشد. لینک بی‌سیم به دلیل پدیده چندمسیری، طبیعت محوشونده دارد که بسیار مستعد خطاست. در کانال محوشده برای بهره‌وری از پدیده مضر چندمسیری و به دست آوردن بهره دایورسیتی[7] از سیستم‌هایی با چند آنتن ارسال و دریافت استفاده می‌شود. به این ترتیب که کانال میان هر حسگر بی‌سیم و مرکز ادغام، یک کانال چندورودی چندخروجی[8] در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه آن دایورسیتی در ارسال و دریافت وجود خواهد داشت.

همان طور که اشاره شد در شبکه‌های حسگر بی‌سیم هدف ردیابی، کشف و تخمین یک پدیده خاص و تحت نظر است. با توجه به این که تمامی حسگرها با چند آنتن در ارسال، قصد ارسال اطلاعات مربوط به یک پدیده خاص به مرکز ادغام را دارند و با توجه به پخش تصادفی حسگرها در محیط تحت بررسی، اطلاعات اندازه‌گیری شده در این شبکه همبسته می‌باشند. لذا به منظور جلوگیری از هدررفت انرژی، کاهش پردازش‌های اضافی در مرکز ادغام، بهبود کیفیت سیگنال دریافتی و افزایش قابلیت اطمینان از روش‌های پیش‌کدگذاری اطلاعات در سمت فرستنده استفاده می‌شود.

پیش‌کدگذاری در واقع انجام عملیاتی در سمت فرستنده بر روی سیگنال‌های اطلاعاتی است. پیش‌کدگذاری در سیستم‌های مختلف به دلایل متفاوتی انجام می‌شود ولی می‌توان در حالت کلی هدف از انجام پیش‌کدگذاری را بهبود سیگنال دریافتی در سمت گیرنده در نظر گرفت.

شبکه‌های حسگر معمولاً به باتری‌های با اندازه کوچک و توان محاسباتی محدودی مجهز هستند، لذا پیش‌کدگذاری غیر خطی به دلیل محدودیت توان محاسباتی و انرژی در این گونه سیستم‌ها انجام نمی‌شود

این مقاله در تاریخ ۱۴ آبان ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۲۶ آبان ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

هستی رستمی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، (email: hasti.rostami1991@gmail.com).

ابوالفضل فلاحتی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، (email: afalahati@iust.ac.ir).

1. Wireless Sensor Network
2. Monitoring
3. Localization
4. Tracking
5. Decentralized Estimation
6. Decentralized Detection
7. Diversity Gain
8. Multiple Input Multiple Output

Archive of SID

www.SID.ir

و تنها از پیش‌کدگذارهای خطی به صورت ماتریس ضرب‌شونده در گره‌های حسگر استفاده می‌گردد. پیش‌کدگذاری در فرستنده‌ها تحت تابع هدف‌های متفاوت با توجه به نیاز سیستم طراحی می‌شود. طراحی ماتریس‌های پیش‌کدگذار برای هدف‌هایی چون حداقل‌سازی میانگین مربع خطا (MMSE)[1] [۶]، حداقل‌سازی واریانس نویز [۹]، حداقل‌سازی توان نویز [۱۰]، افزایش راندمان طیفی[2] [۱۰] و [۱۱]، فشرده‌سازی[3] اطلاعات ارسالی [۱۰]، حداکثرسازی اطلاعات متقابل[4] [۱۱] و حداقل‌سازی احتمال خطا [۱۲] صورت می‌پذیرد. فرایند محاسبه ماتریس‌های پیش‌کدگذار با فرض هر کدام از توابع هدف ذکرشده به یک مسئله بهینه‌سازی[5] منجر می‌شود که برای حل این مسئله بهینه‌سازی از روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی بهره برده می‌شود.

همان طور که ذکر شد یکی از زمینه‌های کاربردی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم تخمین توزیع‌شده می‌باشد که اهمیت آن بر کسی پوشیده نیست. در این پژوهش پیش‌کدگذارهای بهینه طوری طراحی می‌شود که در نهایت خروجی سیستم تخمینی از پارامتر ناشناخته تحت نظر باشد.

با توجه به این که هدف تخمین پارامتر ناشناخته می‌باشد، لذا معیار میانگین مربعات خطا، تابع هدف مناسبی در مسئله بهینه‌سازی طراحی پیش‌کدگذار می‌باشد.

همان طور که اشاره گردید شبکه‌های حسگر بی‌سیم به باتری‌های با ابعاد کوچک و انرژی محدود مجهز شده‌اند و اغلب در محیط‌هایی به کار گرفته می‌شوند که امکان تعویض و یا شارژ دوباره آنها وجود ندارد. لذا مسئله انرژی و استفاده مناسب از آن در این شبکه‌ها امری حیاتی و مهم است که بایستی در تمامی کاربردها در نظر گرفته شود. در این پژوهش محدودیت توان در شبکه حسگر بی‌سیم به صورت یک قید در مسئله بهینه‌سازی لحاظ می‌گردد.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم اغلب در فضای آزاد[6] به کار گرفته می‌شوند و کانال بی‌سیم ماهیتی تصادفی دارد و از آنجایی که ماتریس کانال و تابع گشتاور اول و دوم آن در مسئله طراحی پیش‌کدگذار حضور دارند. در این پژوهش اثر کانال تخمینی در صورت استفاده از دو تخمینگر کانال LS[7] و MMSE بر روی مسئله طراحی پیش‌کدگذار مقایسه و بررسی خواهد شد. در فرایند تخمین کانال از روش تخمین با دنباله آموزشی معلوم استفاده می‌شود. در هر تخمینگر کانال، دنباله آموزشی از یک مسئله بهینه‌سازی استخراج می‌گردد بدین صورت که دنباله آموزشی بهینه با تابع هدف حداقل میانگین مربعات خطای تخمین کانال تحت قید توان که قیدی اساسی در این شبکه‌ها می‌باشد، طراحی می‌شوند.

با توجه به تازگی بحث طراحی پیش‌کدگذار در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، بیشتر تحقیقات این حوزه در تخمین توزیع‌شده انجام گردیده است. در فرایند محاسبه ماتریس‌های پیش‌کدگذار در تخمین، با تعریف تابع هدفی متناسب با میانگین مربعات خطا در نهایت به یک مسئله بهینه‌سازی منتهی می‌شود که با انجام عملیات ریاضی و ساده‌سازی نظیر الگوریتم گوس، گوس سایدل و آب‌پرکنی[8]، مسئله بهینه‌سازی همگرا می‌شود. پس از حل مسئله بهینه‌سازی، ماتریس‌های پیش‌کدگذار بهینه تحت تابع هدف مطلوب به دست می‌آیند. در ادامه اشاره مختصری به مهم‌ترین تحقیقات در طراحی پیش‌کدگذار روی شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌شود.

در [۶] از شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای تخمین توزیع‌شده یک بردار منبع تصادفی استفاده شده که در آن مدل همبستگی حسگرها به صورت تابعی از فاصله میان حسگرها تعریف گردیده است. در این بررسی نیز اطلاعات کامل حالت کانال در دسترس فرض شده است. برای تخمین منبع مد نظر در گیرنده از روش LMMSE[9] در مرکز ادغام استفاده شده و در طراحی ذکرشده قید توان نیز به حسگرها اعمال گردیده است. بدین ترتیب مسئله طراحی پیش‌کدگذار به یک مسئله بهینه‌سازی با قید توان تبدیل شده و با به کارگیری SVD[10]، مسئله بهینه‌سازی به مسئله بهینه‌سازی محدب تبدیل شده و با استفاده از الگوریتم آب‌پرکنی حل شده و بدین ترتیب ماتریس‌های پیش‌کدگذار بهینه به دست می‌آید.

در [۸] یک شبکه حسگر بی‌سیم با مدل مشاهدات خطی در نظر گرفته شده است. در این مورد طراحی پیش‌کدگذار برای حداقل‌سازی MSE یک بردار تصادفی ناشناخته در مرکز ادغام (مرکز ادغام نویزی و بی‌نویز) با فرض دسترسی کامل به اطلاعات کانال بررسی شده است. در مرکز ادغام نویزی، اگرچه طراحی جداگانه پیش‌کدگذار و فیلتر مرکز ادغام به حل بسته منتهی می‌شود اما ماتریس‌های پیش‌کدگذار طراحی‌شده بهینه نیستند. در صورت طراحی توأم پیش‌کدگذار و فیلتر مرکز ادغام، پیش‌کدگذار حل بسته‌ای ندارد و حل آن به صورت تکراری محاسبه می‌شود.

نویسندگان در [۹] و [۱۳] تا [۱۶] با تخصیص توان بهینه در هر حسگر اقدام به حداقل‌سازی معیار MSE کرده‌اند و در [۱۷] و [۱۸] نیز رفتار مجانبی این تخمینگر نسبت به توان و تعداد حسگرها بررسی گردیده است. در [۱۹] به منظور حذف عملیات پردازشی در ارائه تخمین پارامتر ناشناخته، ماتریس‌های پیش‌کدگذار طوری طراحی می‌شوند که سیگنال مد نظر پس از عبور از کانال و دریافت در گیرنده، تخمینی از اطلاعات تحت بررسی را ارائه دهد به طوری که در گیرنده به پردازشی جهت ارائه تخمین نیازی نباشد که این مهم نیز به صورت قیدی در مسئله بهینه‌سازی لحاظ می‌گردد. در این بررسی اطلاعات کامل حالت کانال در نظر گرفته شده است. در [۱۴] نویسندگان با در نظر گرفتن کانال محوشده تصادفی SISO[11] ابتدا به فرایند تخمین کانال و سپس به طراحی پیش‌کدگذار جهت حداقل‌سازی معیار MSE پرداخته‌اند.

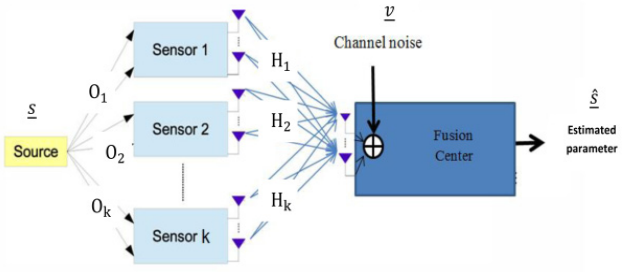
در [۲۰] محققان با فرض کانال محوشده SISO هم در فاز تخمین کانال و هم در فاز تخمین پارامتر ناشناخته با ابزار تخصیص توان بهینه اقدام به طراحی پیش‌کدگذار می‌نمایند.

در بسیاری از مطالعات اطلاعات کامل حالت کانال در دسترس فرض شده است [۹]، [۱۳]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۸] و [۱۹] که در پی آن ماتریس کانال در فرایند تخصیص توان بهینه و طراحی پیش‌کدگذار اثر می‌گذارد اما همان طور که ذکر گردید این فرض در مورد شبکه‌های حسگر بی‌سیم همیشه صحیح نیست. در این پژوهش اثر کانال تخمینی در فرایند تخمین پارامتر ناشناخته تحت کانال‌های MIMO، با توزیع رایلی و با فرض دسترسی به اطلاعات جزیی کانال بررسی می‌گردد.

1. Minimum Mean Square Error
2. Spectral Efficiency
3. Compressing
4. Mutual Information
5. Optimization
6. Free Space
7. Least Square
8. Water Filling
9. Linear Minimum Mean Square Error
10. Singular Value Decomposition
11. Single Input Single Output

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱: مدل سیستم مورد مطالعه [۱۹].

در این مقاله با فرض کانال تصادفی، یک مدل نزدیک‌تر به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب ماتریس‌های پیش‌کدگذار با در نظر گرفتن مدل MIMO-WSN تصادفی به نحوی طراحی می‌گردد که خطای تخمین پارامتر برداری حداقل گردد. مشخصات کانال تصادفی و کانال تخمینی در مسئله تخمین پارامتر برداری اثر می‌گذارد و به منظور بررسی این موضوع، اثر کانال تخمینی با دو معیار LS و MMSE بر ماتریس‌های پیش‌کدگذار و فرایند تخمین مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در ادامه این تحقیق در بخش ۲ به مدل‌سازی ریاضی شبکه حسگر بی‌سیم شامل مدل گره حسگر، مدل کانال و مدل مرکز ادغام پرداخته می‌شود. در بخش ۳ مسئله تخمین کانال با دو تخمینگر LS و MMSE بررسی می‌گردد و در بخش ۴ مسئله طراحی پیش‌کدگذار و تخمین پارامتر ناشناخته ارائه می‌شود. در بخش ۵ به بررسی اثر کانال تخمینی در فرایند تخمین و در بخش ۶ به مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی مدل و روش پیشنهادی پرداخته می‌شود. در بخش ۷ بر اساس شواهد به دست آمده و شبیه‌سازی، نتیجه‌گیری و سپس پیشنهادهایی جهت مطالعه بیشتر و بهینه‌ترکردن مدل ارائه می‌گردد.

۲- مدل سیستم

در این بخش مدل شبکه حسگر بی‌سیم مورد مطالعه شامل مدل مشاهده در گره‌های حسگر، مدل مرکز ادغام و مدل کانال تصادفی تشریح می‌گردد.

۲-۱ مدل گره حسگر

یک شبکه حسگر بی‌سیم را مطابق شکل ۱، متشکل از k گره حسگر به همراه یک مرکز جمع‌آوری اطلاعات (ادغام) در نظر بگیرید که به طور تصادفی در محیط پخش شده‌اند و تمامی این گره‌ها قابلیت جمع‌آوری اطلاعات و ارجاع آن به مرکز ادغام را دارند. حسگرها به طور مشارکتی برای تخمین پارامتر تصادفی $\underline{s}\in C^{p\times 1}$ با ماتریس همبستگی $R_s = E\{\underline{s}\,\underline{s}^H\}$ به کار گرفته شده‌اند. به منظور مقابله با اثر محوشدگی فرض می‌شود هر حسگر به تعداد n آنتن در ارسال و مرکز ادغام نیز به تعداد r آنتن در دریافت مجهز شده‌اند. همچنین فرض می‌شود هر حسگر تعداد m مشاهده از بردار تصادفی $\underline{s}$ انجام می‌دهد. بدین ترتیب سیگنال مشاهده‌شده در گره حسگر iام، $\underline{x_i}\in C^{m\times 1}$ به صورت زیر بیان می‌گردد

$$\underline{x_i} = O_i\underline{s} + \underline{n_i} \qquad (۱)$$

که $\underline{x_i}$ بردار مشاهده در حسگر iام، $O_i\in C^{m\times p}$ ماتریس مشاهده در حسگر iام که در دسترس می‌باشد و در آن m تعداد مشاهدات انجام‌شده در حسگر iام و p نیز تعداد ابعاد بردار ناشناخته $\underline{s}$ است که در دسترس می‌باشد. به عنوان مثال حسگر iام با توجه به نحوه قرارگیری، شرایط و محیط به کارگیری و پارامترهای داخلی‌اش، اطلاعات را با یک ضریب تضعیف مشخص از محیطی که در آن به کار گرفته شده دریافت می‌کند. $\underline{n_i}\in C^{m\times 1}$ نویز مستقل مختلط گوسی مشاهده در حسگر iام با توزیع $\underline{n_i}\sim CN(0, R_{n_i})$ می‌باشد.

اگر $\underline{O_i} = 0$ گردد در این صورت باتری موجود در حسگر iام دشارژ می‌شود و این حسگر، اطلاعاتی از محیط پیرامون دریافت نمی‌کند و خاموش می‌گردد. در این حالت تعداد حسگرهای شبکه، $k-1$ و بدین ترتیب در تمام روابط $k-1$ جایگزین k می‌گردد.

فرض کنید ماتریس پیش‌کدگذار در گره حسگر iام، معلوم است. پس سینگال ارسالی از گره حسگر iام، $\underline{t_i}$ به صورت (۲) قابل بیان است

$$\underline{t_i} = F_i\underline{x_i} = F_i(O_i\underline{s} + \underline{n_i}) \qquad (۲)$$

۲-۲ مدل مرکز ادغام

تمام اطلاعات مهمی که حسگرها از محیط اطراف دریافت می‌کنند برای تصمیم‌گیری به مرکز ادغام ارسال می‌گردد. پهنای باند یکی از منابع مهم در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد که همواره مورد توجه قرار گرفته است [۶]. مطابق آنچه [۶] بیان کرده است استفاده از مدل کانال، دسترسی چندگانه همدوس در سیستم‌های با محدودیت پهنای باند نسبت به کانال‌های دسترسی چندگانه متعامد عملکرد مطلوب‌تری در فرایند تخمین دارد. لذا در این پژوهش فرض می‌شود کانال میان حسگرها و مرکز ادغام یک کانال دسترسی چندگانه همدوس می‌باشد که شمای کلی آن در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. فرض همدوس‌بودن کانال نیاز به هم‌زمان‌سازی دقیق میان حسگرها و مرکز ادغام دارد و اغنای این ملاحظه عملاً دشوار می‌باشد. سیگنال دریافتی در مرکز ادغام تحت کانال مفروض به صورت (۳) مدل می‌گردد [۱۹]

$$\underline{y} = \sum_{i=1}^{k} H_i\underline{t_i} + \underline{v} = (\sum_{i=1}^{k} H_iF_iO_i)\underline{s} + \sum_{i=1}^{k} H_iF_i\underline{n_i} + \underline{v} \qquad (۳)$$

که $\underline{v}\in C^{r\times 1}$ نویز کانال با توزیع مختلط گوسی با ماتریس کوواریانس $R_v = E\{\underline{v}\,\underline{v}^H\}$، $F_i\in C^{m\times m}$ ماتریس پیش‌کدگذار در حسگر iام و $H_i\in C^{r\times n}$ ماتریس کانال میان حسگر iام و مرکز ادغام می‌باشد.

۲-۳ مدل کانال تصادفی

همان طور که اشاره شد کانال بی‌سیم بسیار مستعد خطاست و فرض در دانستن اطلاعات کامل آن عملاً همواره ممکن نیست. از این رو (۳) را می‌توان به صورت (۴) بازنویسی کرد

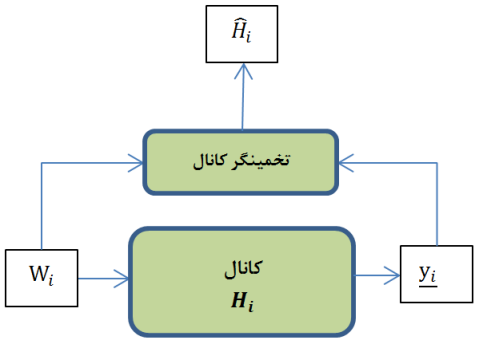
$$\underline{y} = \sum_{i=1}^{k}\hat{H}_i\underline{t_i} + (H_i-\hat{H}_i)\underline{t_i} + \underline{v} = \sum_{i=1}^{k}(\hat{H}_iF_iO_i)\underline{s} + (\sum_{i=1}^{k}(H_i-\hat{H}_i)F_iO_i)\underline{s} + \sum_{i=1}^{k}H_iF_i\underline{n_i} + \underline{v} \qquad (۴)$$

در فرایند طراحی پیش‌کدگذار، ماتریس کانال به طور مستقیم در روابط ظاهر می‌گردد و از آنجایی که در این پژوهش کانال محوشده، مسطح در نظر گرفته شده است لذا برای طراحی ماتریس‌های پیش‌کدگذار بایستی ماتریس کانال تخمین زده شود. در بخش ۳ به تخمین کانال پرداخته می‌شود.

۳- تخمین کانال

یکی از متداول‌ترین روش‌های تخمین کانال استفاده از دنباله آموزشی است بدین ترتیب که مطابق شکل ۲ سیگنالی معین به عنوان دنباله

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲: تخمینگر کانال.

آموزشی بر روی کانال ناشناخته ارسال می‌گردد و در گیرنده بر اساس سیگنال دریافتی و دنباله آموزشی معین تخمینی از کانال ارائه می‌شود. بدین ترتیب دنباله آموزشی $W \in C^{n\times kN}$ جهت تخمین کانال به کار می‌رود. دوره زمانی دنباله آموزشی به k زیردنباله تقسیم می‌شود به این صورت که دنباله آموزشی iام از حسگر iام ارسال می‌گردد، لذا سیگنال دریافتی از حسگر iام، $\underline{y_i}$ پس از عبور از کانال محوشده MIMO، $H_i \in C^{r\times n}$ با ماتریس کوواریانس $R_{H_i} = E\{H_i^H H_i\}$ به صورت (۵) بیان می‌گردد [۱۹]

$$\underline{y_i} = H_i \underline{w_i} + \underline{v_i} \qquad (۵)$$

که در آن $\underline{v_i}$ نویز گوسی جمع‌شونده کانال می‌باشد.

از جمله مهم‌ترین تخمینگرهای خطی، تخمینگر LS و MMSE می‌باشند که در صورت استفاده از تخمینگر MMSE با پذیرش پیچیدگی بیشتر به تخمین بهتری با معیار میانگین مربعات خطا کانال دست یافته می‌شود. در بخش بعدی با دو تخمینگر خطی LS و MMSE به تخمین کانال پرداخته می‌شود.

۳-۱ تخمینگر LS کانال و دنباله آموزشی بهینه متناظر با آن

با فرض در دسترس بودن دنباله آموزشی W_i، کانال تخمین زده شده $\hat{H}_i$ با معیار LS برابر است با [۲۱]

$$\hat{H}_i^{LS} = \underline{y_i} W_i (W_i W_i^H)^{-1} \qquad (۶)$$

از آنجایی که مسئله توان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم امری حیاتی است لذا دنباله آموزشی W_i تحت قید توان از مسئله بهینه‌سازی زیر به صورتی استخراج می‌گردد که میانگین مربعات خطای ناشی از تخمین کانال حداقل گردد [۲۱]

$$\min\left\{ j_{LS} E\left[\| H_i - \hat{H}_i^{LS} \|_F^2 \right] \right\} \qquad (۷)$$
$$W_i \quad \|W_i\|_F^2 \le p.$$

پس از حل آن دنباله آموزشی بهینه W_i به صورت زیر بیان می‌گردد

$$W_i = \sqrt{\frac{p.}{Nn}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & e^{\frac{j2\pi}{N}} & \cdots & e^{\frac{j2\pi(N-1)}{N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{\frac{j2\pi(n-1)}{N}} & \cdots & e^{\frac{j2\pi(n-1)(N-1)}{N}} \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

بدین ترتیب با اعمال دنباله آموزشی معلوم (۷) بر روی کانال تصادفی و استفاده از تخمینگر کانال LS میانگین مربعات خطای ناشی از تخمین کانال حداقل خواهد شد. در ادامه به بررسی تخمینگر کانال MMSE و دنباله آموزشی بهینه متناظر با آن پرداخته می‌شود.

۳-۲ تخمینگر MMSE کانال و دنباله آموزشی بهینه متناظر با آن

کانال تخمین زده شده با معیار MMSE برابر است با [۲۱]

$$\hat{H}_i^{MMSE} = \underline{y_i}(W_i^H R_{H_i} W_i + tr(R_{v_i}))^{-1} W_i^H R_{H_i}$$
$$E = H_i - \hat{H}_i^{MMSE} \qquad (۹)$$

کوواریانس خطای کانال و میانگین مربعات خطای تخمین کانال در (۱۰) آورده شده است

$$R_E = E\{EE^H\} = (R_{H_i} - (tr(R_{v_i}))^{-1} W_i W_i^H)^{-1}$$
$$j_{MMSE} = E\{\| H_i - \hat{H}_i^{MMSE} \|_F^2 = tr(R_E)\} \qquad (۱۰)$$

دنباله آموزشی W_i تحت قید مفروض توان، $\|W_i\|_F^2 \le p.$ و با حل مسئله بهینه‌سازی (۱۱) با روش آب‌پرکنی، نهایتاً به صورت (۱۲) خلاصه می‌گردد [۲۱]

$$\min\left\{ j_{MMSE} = E\left[\| H_i - \hat{H}_i^{MMSE} \|_F^2 \right] \right\} \qquad (۱۱)$$
$$W_i \quad \|W_i\|_F^2 \le p.$$

$$W_i = \sqrt{tr(R_{v_i})} Q_i ([\mu. I - \wedge_i^{-1}]^+)^{0.5} \qquad (۱۲)$$

که در آن پارامتر $\mu.$ از رابطه قید توان و Q_i و $\wedge_i^{-1}$ از تجزیه مقادیر منفرد ماتریس کوواریانس کانال دست می‌آیند. حال در ادامه به هدف اصلی از طراحی ماتریس پیش‌کدگذار پرداخته می‌شود.

۴- مسئله تخمین پارامتر ناشناخته در کانال‌های تصادفی

فرضاً اطلاعات کامل حالت کانال در دسترس نیست و اطلاعات جزئی کانال همانند نوع توزیع، گشتاور اول و دوم آن در دسترس می‌باشد.

۴-۱ اعمال قید تخمین بی‌اعوجاج

جهت حذف دیکدر در مرکز ادغام و دریافت تخمین از پارامتر ناشناخته بدون انجام پردازشی در مرکز ادغام، ماتریس‌های پیش‌کدگذار مشترکاً بایستی طوری طراحی شوند که شرط زیر را ارضا نمایند

$$\underline{y} = \hat{\underline{s}} = \sum_{i=1}^{k} H_i \underline{t_i} + \underline{v} = (\sum_{i=1}^{k} H_i F_i O_i)\underline{s} + \sum_{i=1}^{k} H_i F_i \underline{n_i} + \underline{v}$$
$$\sum_{i=1}^{k} H_i F_i O_i = D \qquad (۱۳)$$

که در آن ماتریس D به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$D = \begin{cases} \begin{bmatrix} I_p \\ 0_{(r-p)\times p} \end{bmatrix} & , \quad r > p \\ [I_r \quad 0_{r\times(p-r)}] & , \quad r \le p \end{cases} \qquad (۱۴)$$

این شرط به صورت یک قید در مسئله تخمین اعمال می‌شود.

۴-۲ اعمال قید محدودیت توان

برای اعمال محدودیت توان در شبکه توصیف‌شده، ابتدا لازم است توان ارسالی از حسگر iام محاسبه گردد

$$(pw)_i = tr(E\{\underline{t_i}\,\underline{t_i}^H\}) \qquad (۱۵)$$

Archive of SID

www.SID.ir

از آنجایی که ماتریس مشاهده حسگر در دسترس است لذا (۱۵) پس از ساده‌سازی به صورت زیر بیان می‌گردد

$$(pw)_i = tr(E\{\underline{t}_i \underline{t}_i^H\}) = tr(F_i(O_i R_s O_i^H + R_{n_i})F_i^H) \quad (۱۶)$$

قید محدودیت توان کلی در گره‌های حسگر به صورت زیر اعمال می‌شود

$$\sum_{i=1}^{k}(pw)_i \le p. \qquad \sum_{i=1}^{k} tr(F_i(O_i R_s O_i^H + R_{n_i})F_i^H) \le p. \quad (۱۷)$$

۴-۳ طراحی پیش‌کدگذار

خطای تخمین پارامتر برداری ناشناخته با اعمال قید بی‌اعوجاجی تخمین با در نظر گرفتن $r = p$ به صورت (۱۸) بیان می‌گردد

$$\varepsilon_s = s - \hat{s} = -\left[\left(\sum_{i=1}^{k}(H_i - \hat{H}_i)F_i O_i\right)\underline{s} + \left(\sum_{i=1}^{k} H_i F_i \underline{n_i}\right) + \underline{v}\right] \quad (۱۸)$$

از طرفی معیار طراحی پیش‌کدگذار، میانگین مربعات خطای تخمین می‌باشد که برابر است با

$$MSE_s = tr(E\{\varepsilon_s \varepsilon_s^H \,|\, \hat{H}\}) \quad (۱۹)$$

هدف، حداقل‌سازی (۱۹) تحت دو قید بی‌اعوجاجی تخمین و محدودیت توان است که خروجی آن ماتریس‌های پیش‌کدگذار می‌باشد و می‌توان آن را به فرم زیر بیان نمود

$$\text{Minimize } MSE_s = tr(E\{\varepsilon_s \varepsilon_s^H \,|\, \hat{H}\})$$
$$F_1, F_2, \ldots, F_k \ \text{s.t} \begin{cases} \sum_{i=1}^{k} tr(F_i(O_i R_s O_i^H + R_{n_i})F_i^H) \le p. \\ \sum_{i=1}^{k} H_i F_i O_i = D \end{cases} \quad (۲۰)$$

در صورت استفاده از کانال تخمینی، پیش‌کدگذار بهینه پس از کمی ساده‌سازی و اعمال قیود تخمین و توان در نهایت از رابطه بهینه‌سازی (۲۱) حاصل می‌گردد [۱۹]

$$\text{Minimize } \underline{f}^H Z \underline{f} + tr(R_v)$$
$$\underline{f} \ \text{s.t} \begin{cases} U\underline{f} = \underline{d} \\ \underline{f}^H C \underline{f} \le p. \end{cases} \quad (۲۱)$$

که پس از حل این مسئله بهینه‌سازی، پیش‌کدگذار $\underline{f}$ به صورت (۲۲) بیان می‌گردد [۱۹]

$$\underline{f} = Z^{-1}U^H(UZ^{-1}U^H)^{-1}\underline{d} \quad (۲۲)$$

که در آن $\underline{f} = [vec(F_1)^H vec(F_2)^H \ldots vec(F_k)^H]^H$ برداری است که عناصر تشکیل‌دهنده آن ماتریس‌های پیش‌کدگذار است.

پارامترهای زیر جهت ساده‌سازی و بیان برداری مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌گردد

$$Z_i = [((O_i R_s O_i^H)^T \otimes CO_i) + (R_{n_i}^T \otimes R_{H_i})]$$
$$CO_i = R_{H_i} - R_{H_i}\underline{w_i}(\underline{w_i}^H R_{H_i}\underline{w_i} + tr(R_{v_i}))^{-1}\underline{w_i}^H R_{H_i}$$
$$Z = diag(Z_1, Z_2, \ldots, Z_k)$$
$$U_i = O_i^T \otimes \hat{H}_i$$

$$U = [U_1 U_2 \ldots U_k]$$
$$D = \begin{cases} \begin{bmatrix} I_p \\ \cdot_{(r-p)\times p} \end{bmatrix} & , \ r > p \\ [I_r \quad \cdot_{r\times(p-r)}] & , \ r \le p \end{cases}$$
$$\underline{d} = vec(D)$$

بدین ترتیب با جایگذاری کانال تخمین زده شده (۶) و (۹)، در نهایت ماتریس‌های پیش‌کدگذار مطابق (۲۲) به دست می‌آیند. در بخش بعدی مقایسه‌ای میان عملکرد دو تخمینگر کانال انجام می‌شود.

۵- بررسی اثر کانال تخمینی در فرایند تخمین

تخمینگر کانال LS در مقایسه با تخمینگر MMSE ساده‌تر و عملکرد MSE ضعیف‌تری دارد. اگرچه عملکرد MSE تخمینگر LS ضعیف‌تر است ولی در فرایند طراحی پیش‌کدگذار کانال به طور مستقیم در روابط ظاهر می‌شود که در ادامه به بررسی عملکرد تخمینگر کانال بر فرایند تخمین پارامتر ناشناخته پرداخته می‌شود.

با مقایسه (۱۰) و (۱۳) مشاهده می‌گردد عبارت R_E که در واقع اثر آن به عنوان خطای تخمینگر کانال MMSE می‌باشد با علامت منفی در درون عبارت $\underline{f}^H Z \underline{f} + tr(R_v)$ که همان حداقل میانگین مربعات خطای تخمین پارامتر ناشناخته است ظاهر می‌شود.

در هر تخمینگر کانال دنباله آموزشی به نحوی طراحی شده که میانگین مربعات خطای ناشی از تخمین کانال حداقل گردد. از آنجایی که در تخمینگر کانال MMSE نسبت به LS، میانگین مربعات خطای تخمین کانال کمتر است لذا در صورت استفاده از تخمینگر کانال MMSE تحت شرایط کاملاً مشابه در مقایسه با تخمینگر کانال LS عملکرد نهایی سیستم ضعیف‌تری خواهد شد. در بخش بعدی شبیه‌سازی این عملکرد بررسی می‌شود.

۶- نتایج شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی، یک شبکه حسگر بی‌سیم را متشکل از ۵ گره حسگر به همراه یک مرکز ادغام و سیگنال ناشناخته مختلط $\underline{s}$ با میانگین صفر و واریانس واحد در نظر بگیرید. بردار نویز مشاهدات حسگرها نیز مستقل با توزیع یکسان در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب که بردار نویز مشاهده در گره حسگر iام یک متغیر تصادفی جمع‌شونده با توزیع مختلط گوسی کروی با میانگین صفر و واریانس واحد در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، نویز گوسی جمع شونده کانال نیز دارای توزیع مختلط گوسی کروی با میانگین صفر و واریانس $1/SNR$ در نظر گرفته می‌شود و توان حسگرها به dB ۰ محدود می‌گردد. کانال میان حسگر iام و مرکز ادغام یک کانال MIMO، ۲×۲ با توزیع رایلی و ماتریس همبستگی واحد است. در این پژوهش کانال ناشناخته است و با دو تخمینگر LS و MMSE تخمینی از کانال ارائه خواهد شد. دنباله آموزشی ورودی برای هر تخمینگر کانال مطابق (۸) و (۱۲) طراحی می‌گردد. برای بررسی عملکرد تخمینگر کانال، میانگین مربعات خطای ناشی از تخمین کانال بررسی می‌شود که با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و اجرای ۲۰۰۰ بار برنامه، نتایج در شکل ۳ برای دو تخمینگر کانال ترسیم شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد در صورت استفاده از دنباله‌های آموزشی بهینه معیار مذکور در مورد تخمینگر کانال MMSE عملکرد بهتری دارد که این مورد انتظار می‌باشد.

حال اثرات دو تخمینگر کانال بر فرایند طراحی ماتریس پیش‌کدگذار به

Archive of SID

www.SID.ir

جهت تخمین پارامتر ناشناخته بررسی می‌شود. همان طور که در بخش ۵ ذکر گردید عملکرد کلی سیستم در صورت استفاده از تخمینگر کانال MMSE، در مقایسه با تخمینگر کانال LS وضعیت بدتری خواهد داشت. بدین منظور خطای ناشی از تخمین پارامتر برداری ناشناخته بر حسب SNR در صورت استفاده از دو تخمینگر کانال MMSE و LS در شکل ۴ رسم شده است.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف نهایی در این پژوهش ارائه تخمین از پارامتر برداری ناشناخته است که در پی آن نیاز به تخمین کانال می‌شود. همان طور که ملاحظه گردید در تخمین کانال معیار MMSE نسبت به معیار LS عملکرد MSE بهتری دارد ولی با اعمال تخمینگر کانال بر سیستم مفروض جهت تخمین پارامتر برداری ناشناخته، عملاً ملاحظه می‌گردد در صورت استفاده از تخمینگر کانال LS نسبت به MMSE عملکرد MSE بهتری دارد. در پروژه‌های آتی پیشنهاد می‌گردد که دنباله آموزشی مورد استفاده در تخمین کانال به گونه‌ای طراحی شود که خطای ناشی از تخمین کانال و خطای ناشی از تخمین پارامتر برداری ناشناخته توأماً حداقل گردد که این مسئله به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه منجر می‌شود. خروجی مسئله، دنباله آموزشی طراحی‌شده و ماتریس‌های پیش‌کدگذار است و بدین ترتیب با به کارگیری دنباله آموزشی بهینه و پیش‌کدگذار بهینه توأماً خطای ناشی از تخمین کانال و تخمین پارامتر برداری حداقل می‌گردد.

مراجع

[1] D. Li, K. D. Wong, Y. H. Hu, and A. M. Sayeed, "Detection, classification, and tracking of targets," *IEEE Signal Process. Mag*, vol. 19, no. 2, pp. 17-29, Mar. 2002.

[2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Commun. Mag*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.

[3] J. J. Xiao, A. Xiao, Z. Q. Luo, and G. B. Giannakis, "Distributed compression-estimation using wireless sensor networks," *IEEE Signal Process. Mag*, vol. 23, no. 4, pp. 27-41, Jul. 2006.

[4] Z. Zhao, A. Swami, and L. Tong, "The interplay between signal processing and networking in sensor networks," *IEEE Signal Process. Mag*, vol. 23, no. 4, pp. 84-93, Jul. 2006.

[5] G. Hug, J. Mohammadi, and J. M. F. Moura, "Distributed state estimation and energy management in smart grids: a consensus + innovations approach," *IEEE Signal Process. Mag*, vol. 8, no. 6, pp. 1022-1038, Dec. 2014.

[6] J. J. Xiao, S. Cui, Z. Q. Luo, and A. J. H. Goldsmit, "Linear coherent decentralized estimation," *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 56, no. 2, pp. 757-770, Feb. 2008.

[7] A. S. Arifin and T. Ohtsuki, "Linear precoding for distributed estimation of correlated sources in WSN MIMO system," in *Proc. IEEE 77th Vehicular Technology Conf.*, 5 pp., Dresden, Germany, 2-5 Jun. 2013.

[8] M. Gastpar, "Uncoded transmission is exactly optimal for a simple gaussian "sensor" network," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 11, pp. 5247-5251, Nov. 2008.

[9] A. S. Behbahani, A. M. Eltawil, and H. Jafarkhani, "Linear decentralized estimation of correlated data for power-constrained wireless sensor networks," *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 60, no. 11, pp. 6003-6016, Nov. 2012.

[10] A. Goyal, K. Dey, and A. K. Jagannatham, "Optimal transmit precoding for distributed estimation in correlated wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Electronics, Computing and Communication Technologies*, *CONECCT*'14, 6 pp., Bangalore, India, 6-7 Jan. 2014.

[11] J. Fang, H. Li, Z. Chen, and S. Li, "Optimal precoding design and power allocation for decentralized detection of deterministic signals," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 60, no. 6, pp. 3149-3163, Jun. 2012.

[12] J. Fang, H. Li, Z. Chen, and Y. Gong, "Joint precoder design for distributed transmission of correlated sources in sensor networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 2918-2929, Jun. 2013.

[13] A. S. Behbahani, A. M. Eltawali, and H. Jafarkhoni, "Linear estimation of correlated vector sources for wireless sensor networks with fusion center," *IEEE Wireless Commun. Lett*, vol. 1, no. 4, pp. 400-403, Aug. 2012.

[14] H. Senol and C. Tepedelenlioglu, "Performance of distributed estimation over unknown parallel fading channels," *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 56, no. 12, pp. 6057-6068, Dec. 2008.

[15] S. Cui, J. J. Xiao, A. J. Goldsmith, Z. Q. Luo, and H. V. Poor, "Estimation diversity and energy efficiency in distributed sensing," *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 55, no. 9, pp. 4683-4695, Sept. 2007.

[16] I. Bahceci and A. K. Khandani, "Linear estimation of correlated data in wireless sensor networks with optimum power allocation and analog modulation," *IEEE Trans. Commun*, vol. 56, no. 7, pp. 1146-1156, Jul. 2008.

[17] M. K. Banavar, C. Tepedelenlioglu, and A. Spanias, "Estimation over fading channels with limited feedback using distributed sensing," *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 58, no. 1, pp. 414-425, Jan. 2010.

[18] K. Liu, H. E. Gamal, and A. M. Sayeed, "On optimal parametric field estimation in sensor networks," in *Proc. of IEEE/SP 13th Workshop on Statistics and Signal Processing*, pp. 1170-1175, Bordeaux, France, 17-20 Jul. 2005.

[19] N. K. D. Venkategowda and A. K. Jagannatham, "Optimal minimum variance distortionless precoding (MVDP) for decentralized estimation in MIMO wireless sensor networks," *IEEE Signal Process. Lett*, vol. 22, no. 6, pp. 696-700, Jun. 2015.

[20] C. H. Wu and C. A. Lin, "Linear coherent distributed estimation over unknown channels," *Signal Processing, Elsevier*, vol. 91, no. 4, pp. 1000-1011, Apr. 2011.

[21] M. Biguesh and A. B. Gershman, "MIMO channel estimation: optimal training and tradeoffs between estimation techniques," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communication*, vol. 5, pp. 2658-2662, Jun. 2004.

هستی رستمی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق- مخابرات در سال ۱۳۹۲ و مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-مخابرات- سیستم در سال ۱۳۹۵ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است و از سال ۹۰ تا کنون درآزمایشگاه سیستم های رمزنگاری کدینگ دیجیتال مشغول می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه های حسگر بیسیم، تخمین توزیع شده، کدینگ اطلاعات و کانال.

ابوالفضل فلاحتی مدرک کارشناسی مهندسی برق از دانشگاه واریک- کاونتری- انگلستان و مدارک کارشناسی ارشد و دکترا مهندسی برق از دانشگاه لاقبرا- انگلستان و مدرک فوق دکترا خود را از دانشگاه رادرفورد اپلتون- آکسفورد- انگلستان دریافت نمود. پس از آن تا کنون به‌عنوان هیأت علمی در دانشگاه علم و صنعت ایران به تدریس و پژوهش پرداخته و در حال حاضر دارای درجه دانشیاری می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند سیستم‌های مخابرات دیجیتال،کدینگ کانال و نظریه اطلاعات، رمزنگاری و روش های حمله، توابع یکطرفه و بیضوی، مخابرات فوق پهن باند، رادیو شناختگر، امنیت سیستم‌های مخابراتی، نسل سوم و چهارم موبایل و وایمکس می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir