



تخمین فرکانس به روش نورم P توزیع شده در شبکه حسگر بی سیم

علی شادمان فر^۱، هادی زیانی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مخابرات سیستم، موسسه آموزش عالی پویش قم
۲- استادیار، گروه مخابرات، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم

zayyani@qut.ac.ir

ارسال: اردیبهشت ۹۷ پذیرش: خرداد ۹۷

چکیده

تخمین و شناسایی پارامترهای سیگنال همچون فرکانس دارای کاربردهای پر اهمیتی در پردازش سیگنال می باشد. روش ها و الگوریتم های بسیاری برای تخمین پارامترها به خصوص فرکانس توسط یک حسگر ارائه شده است. در تخمین پارامترها توسط یک حسگر، نمونه برداری ممکن است به اندازه کافی دقیق نباشد و همچنین نویز و اختلالات گوناگون در نتیجه نهایی، تاثیر منفی داشته باشند. در اینجا ما پیشنهاد می کنیم با استفاده از شبکه های حسگر بی سیم و دریافت چندین سیگنال با فرکانس مشترک، فرکانس سیگنال به صورت توزیع شده و با استفاده از روش حداقل میانگین مربعات خطا و حداقل میانگین نورم p خطای توزیع شده، تخمین زده شود. روش ارائه شده در جهت آن است که در یک شبکه چندین حسگر، بتوان تخمین دقیقی از فرکانس با سرعت همگرایی بالا و دقت بالا به کمک روش های توزیع شده بدست آورد. علاوه بر تخمین توزیع شده فرکانس، این روش توانایی تخمین دقیق فاز و دامنه را به صورت محلی دارا می باشد. در این مقاله، هر سه استراتژی توزیع شده افزایشی، اجماع و پراکندگی با تکیه بر روش پراکندگی مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج شبیه سازی، اثربخشی الگوریتم پراکندگی پیشنهادی از نظر پیچیدگی و دقت تخمین را در مقایسه با سایر روش ها نشان می دهد.

کلمات کلیدی: تخمین و شناسایی پارامتر سیگنال، تخمین فرکانس توزیع شده، فیلتر وفقی، شبکه حسگر بی سیم، الگوریتم حداقل مربع خطا.

۱- مقدمه

توسعه فناوری تجهیزات الکترونیکی و به دنبال آن پیشرفت سیستم های الکترونیکی، حساسیت بهره مندی از شناسایی سیگنال را بالا برده است. کنترل و نظارت از اموری است که مهندسین حال حاضر را جهت تصمیم گیری و حفاظت از سیستم ها و ادار می نماید. پارامترهای مهمی از سیگنال، همچون دامنه، فاز و فرکانس در دسته بندی فرآیند شناخت سیگنال قرار دارند. با توجه به اهمیت حفظ ثبات سیستم های الکترونیکی و مخابراتی، برای اینکه بتوان تخمین^۲ صحیح و دقیق این پارامترها را در شرایط مختلف و محیط های پر اختلال انجام داد، روش های بسیاری ارائه شده است [۱].

¹ Email: en.alishademan@gmail.com

² Estimation

استفاده از شبکه‌های حسگر بی سیم^۳ را به دهه پنجاه میلادی و زمان جنگ سرد بین دو ابر قدرت نسبت می‌دهند. گفته می‌شود برای اولین بار در جنگ ویتنام مورد استفاده قرار گرفته است. اما آنچه مسلم است کاربرد گسترده آن بوده که به دو دهه اخیر بر می‌گردد [۲].

پیشرفت‌های اخیر در فناوری ساخت مدارهای مجتمع در اندازه‌های کوچک از یکسو و توسعه فناوری ارتباطات بی سیم از سوی دیگر زمینه‌ساز طراحی شبکه‌های حسگر بی سیم شده است. عناصر اصلی در شبکه حسگر بی سیم شامل، حسگر یا سنسور^۴، پردازنده مرکزی^۵ و بخش ارتباطی و مخابراتی (فرستنده - گیرنده) می‌باشد [۲]، [۳].

شبکه‌های حسگر بی سیم با توجه به نوع کاربردها از دهه‌ها تا صدها حسگر تشکیل می‌شوند. حسگرها با ساختاری استاندارد و از پیش تعیین شده در محل قرار خواهند گرفت و یا به صورت نامشخص و توزیع شده در فضا قرار می‌گیرند. از جمله ساختارهای استاندارد حسگرهای درون شبکه، ساختار یک به یک^۶، ساختار ستاره ای^۷، ساختار مش همچنین ساختار خوشه درختی که نیز نوعی ترکیبی از ساختارهای اصلی است، می‌توان اشاره نمود [۲].

حسگرها یک رخداده یا وضعیت فیزیکی را از طریق الگوریتم^۸های منحصر به فرد تشخیص داده، و نتایج حاصله را پس از تبدیل به سیگنال الکتریکی جهت تجزیه و تحلیل پارامترهای مدنظر محیط، به مراکز مدیریتی جهت تصمیم‌گیری ارسال می‌نمایند. مراکز مدیریتی مذکور می‌توانند شامل، سیستم‌های پشتیبان، مراکز پردازش رایانه‌ای، سرورهای اداری و یا اپراتورهای انسانی متناسب با طراحی و کاربرد شبکه، باشند [۴].

در مجموع، ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه‌های حسگر بی سیم، که در سایه فناوری‌های مربوطه بدست آمده، باعث توسعه سریع کاربردهای آن گردیده است. به طوری که در عصر حاضر شاهد استفاده گسترده آن در بخش‌های مختلف صنایع نظامی، امنیتی، مهندسی پزشکی، حمل و نقل، صنعت، محیط زیست، شبکه‌های تولید، انتقال و توزیع برق و... می‌باشد [۴]، [۵]. از کاربردهای اساسی این شبکه‌ها مربوط به محیط‌هایی می‌شود که انسان نمی‌تواند در آن حضور داشته باشد [۲].

از جمله نمونه‌های کاربردی این نوع از شبکه‌ها می‌توان به، ردیابی حرکات حیوانات جهت نظارت بر شرایط زیست محیطی، کنترل مخاطرات طبیعی و غیر طبیعی زیستی همچون، تشخیص آتش سوزی جنگل، بررسی شرایط جوی، تشخیص سیل اشاره کرد. به طور نمونه، کاربرد شبکه‌های حسگر بی سیم در حوزه بهداشتی و درمانی شامل، کنترل و نظارت افراد معلول، نظارت یکپارچه بیمار، نظارت بر داده فیزیولوژیکی انسان و... می‌باشد. کاربری نظامی و دفاعی این نوع از شبکه‌های بی سیم می‌تواند، شناسایی و انهدام تجهیزات و عوامل دشمن از طریق شناسایی و تخمین صوت، فرکانس و مکان‌یابی و سپس ردگیری جنگنده‌های دشمن و هدف‌گیری به کمک سلاح‌های پیشرفته باشد [۲-۵].

کاربردهای ذکر شده و بسیاری دیگر از کاربردهای صنعتی و غیر صنعتی، گواه اهمیت بالا و سطح گستردگی این شبکه‌ها در تمام زمینه‌های علمی و کاربردی است، که با توجه به نیاز رو به رشد و توسعه سریع سیستم‌ها، اهمیت پایش دقیق و سریع اطلاعات و همچنین ارسال و دریافت اطلاعات محیطی از طریق تکنولوژی‌های نوین مخابراتی اموری مهم تلقی می‌شود.

این فن آوری همچنین باعث توسعه ریز حسگرها شده است. این ریز حسگرها توانایی انجام حس‌های بی شماری مانند شناسایی صدا و فرکانس برای حس کردن زلزله را دارند. همچنین جمع‌آوری اطلاعات در مناطق دور افتاده و مکان‌هایی که برای اکتشاف انسانی مناسب نیست را فراهم کرده است. به طور نمونه، در موقعیت‌های حساس نظامی، ریز حسگرها می‌توانند توسط هواپیما بر روی خطوط دشمن ریخته شوند و پس از تشکیل یک شبکه توزیع یافته، برای ردگیری هدف دشمن به کار روند [۴]، [۵].

^۲ Wireless sensor network

^۳ Sensor

^۴ Central processor

^۵ Star structure

^۶ Tree structure

^۷ Algorithm

^۸ Server

در این میان شبکه‌های حسگر بی سیم، دارای توانایی تجزیه و تحلیل پارامترهای محیطی و سپس ارسال نتایج اطلاعات به پایگاه‌های داده و نهایتاً قابلیت دریافت و انجام عکس العمل‌های متناسب با شرایط را بر عهده دارند [۴]. لذا توانمندی این شبکه‌ها از یک سو و اهمیت تخمین پارامترهای سیگنال به ویژه فرکانس از سوی دیگر، زمینه را برای تحقیق و تلفیق این دو فراهم نموده است. الگوریتم‌های تخمین و شناسایی فرکانس سیگنال را می‌توان به دو دسته روش‌های تک حسگر یا غیرتوزیع شده و روش‌های چند حسگر یا توزیع شده^۹ تقسیم بندی نمود.

روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف تک حسگر، بر مبنای پردازش سیگنال^{۱۱} به وجود آمده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌هایی همچون، تبدیل فوریه گسسته^{۱۲} (DFT) [۶-۸]، حداقل مربعات وزندهی شده^{۱۳} [۹]، روش حداقل مربع خطا^{۱۴} [۱۰]، تکنیک‌های هوش عصبی^{۱۵} [۱۱]، الگوریتم‌هایی همچون موجک بازگشتی^{۱۶} [۱۲]، نیوتن^{۱۷} [۱۳]، [۱۴]، فیلتر کالمن^{۱۸} [۱۵]، حلقه قفل فاز^{۱۹} [۱۶] و تکنیک عبور از صفر^{۲۰} [۱۷] اشاره نمود. این موارد، نمونه‌هایی از روش‌های متعدد موجود و در حال توسعه در این حوزه هستند، که کاربردهای بیشتری را دارا می‌باشند.

روش‌های مختلفی برای تخمین توزیع شده در شبکه حسگر بی سیم ارائه شده است. در حالت کلی سه روش متداول آن روش افزایشی^{۲۱}، روش اجماع^{۲۲} و روش پراکندگی^{۲۳} می‌باشد. از بین این سه روش، با توجه به مزایای روش پراکندگی، از این روش بیشتر استفاده می‌شود [۱۸]. در این روش، پس از به روز رسانی تخمین در هر حسگر، با پراکندگی تخمین‌ها، تخمین‌های حسگرهای مجاور با همدیگر ترکیب شده و تخمین نهایی بدست می‌آید.

در این مقاله، روش حداقل نرم p خطای توزیع شده (dLMP)^{۲۴} در سه استراتژی^{۲۵} افزایشی، اجماع و پراکندگی، برای تخمین فرکانس توزیع شده سیگنال مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. در روش پیشنهادی، براساس تعریف توابع هزینه^{۲۶} مناسب، یک روش توزیع یافته برای تخمین فرکانس سیگنال‌های سینوسی معمولی با فرکانس معمول در یک شبکه حسگر بی سیم استفاده می‌شود.

یکی از مزایای روش پیشنهاد شده این بوده که، توانایی داشته به صورت همزمان، علاوه بر تخمین فرکانس توزیع شده، دامنه و فاز سیگنال سینوسی را به صورت محلی^{۲۷} در هر حسگر با همگرایی دقیق و سرعت بالا تخمین نماید. همچنین نتایج نشان می‌دهد که، پیچیدگی روش ارائه شده کمتر از الگوریتم مبتنی بر فیلتر ناچ توزیع شده است، چرا که از فیلتر ناچ برای از بین بردن فرکانس مرکزی سینوسی بهره نمی‌گیرد.

در بخش دوم این مقاله، اجمالاً به شناخت و بررسی برخی از روش‌های موجود تک حسگر و توزیع یافته پرداخته شده و سپس در بخش سوم این مقاله، روش ارائه شده توزیع یافته را بیان خواهیم کرد. در بخش چهارم به نتایج حاصل شده از شبیه سازی و

⁹Distributed

¹⁰Digital signal processing

¹¹Discrete fourier transform

¹²Weighted least square

¹³Least mean square

¹⁴Artificial intelligence

¹⁵Recursive wavelet transform

¹⁶Newton algorithm

¹⁷Kalman filter

¹⁸Phase locked loop

¹⁹Zero crossing

²⁰Incremental

²¹Consensus

²²Diffusion

²³Distributed least mean p-norm

²⁴ Strategy

²⁵Cost function

²⁶Local

مقایسه روش‌های توزیع یافته و تک حسگره در شرایط خاص نسبت به روش پیشنهادی پرداخته شده و نتیجه گیری حاصله در بخش پنجم آمده است

۲- مرور روش‌های شناسایی و تخمین سیگنال

شناخت دقیق سیگنال و پارامترهای آن کمک بسیاری به عملکرد صحیح و دقیق سیستم می‌نماید. کاربرد این مبحث در حوزه نظامی جهت تشخیص فرکانس داپلر^{۲۸} جنگنده یا بالگرد و تجهیزات دشمن از طریق رادار و سایر تجهیزات شناسایی، پس از تحلیل فرکانس جهت مقابله با آن لازم و ضروری است. در حوزه امنیتی و تشخیص فرکانس صوتی خاص در میان انبوهی از اصوات و نویزهای مختلف محیطی و حتی در حوزه صنعتی و شبکه‌های هوشمند برق^{۲۹} و بسیار موارد کاربردی دیگر، گواه اهمیت تخمین و تشخیص به موقع پارامترهای سیگنال و خطا به وجود آمده در سیستم خواهد بود. روش‌های متعددی در دو دسته تک حسگره و توزیع یافته، جهت آن که بتوان فرکانس سیگنال را با دقت و سرعت بالای همگرایی تخمین زد، ارائه شده است. در ادامه به صورت مختصر روش‌های مهم و مورد استفاده در مقاله را بیان شده است.

۲-۱- روش‌های تک حسگره (غیر توزیع یافته)

روش‌های بسیاری برای تخمین پارامترهای سیگنال در شرایط تک حسگره ارائه شده، که براساس کاربرد و اهمیت، برخی از این روش‌ها در ادامه بیان شده است.

روش تخمین حداکثر درست نمایی^{۳۰} (ML) برای تخمین پارامترهای سیگنال توسط حسگرها، عمدتاً جزء محبوب‌ترین رویکرد برای ارزیابی تخمین‌های عملی است. در این بخش، به تخمین دامنه و فاز از طریق این روش اشاره شده است. تخمین‌های روش بیشینه درست نمایی (ML) در رابطه (۱) و (۲) آورده شده است [۱۹].

$$A = \frac{2}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \exp(-j2\pi f_0 n) \right| \quad (1)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{-\sum_{n=0}^{N-1} X(n) \cos(2\pi f_0 n)}{\sum_{n=0}^{N-1} X(n) \sin(2\pi f_0 n)} \right) \quad (2)$$

که در روابط ذکر شده، $X(n)$ سیگنال ورودی و f_0 فرکانسی است، که اندازه تبدیل فوریه گسسته طیف سیگنال، در آن ماکزیمم می‌شود، می‌باشند [۱۹].

روش و الگوریتم دیگری در سال‌های اخیر، در حوزه تبدیل فوریه گسسته و تبدیل فوریه سریع^{۳۱} ارائه شده است. در سال ۲۰۱۲ روشی برای تشخیص فرکانس با دقت بالا با استفاده از نمونه برداری DFT^{۳۲} در سه نقطه ارائه شده است [۶]، [۷]. در واقع این روش با انجام دو مرحله زیر، توانایی ردیابی و تخمین فرکانس را دارا می‌باشد.

۱- جستجو در مقیاس بزرگی از سیگنال با N نقطه DFT

۲- تخمین دقیق‌تر، بر اساس نتایج جستجوی مرحله اول

²⁷Doupler frequency

²⁸Smart grid

²⁹Maximum likelihood

³⁰Fast fourire transform

³¹Three DFT sample

هنگامی که نویز مشاهده شده در سیگنال، نویز سفید گوسی^{۳۳} باشد، در واقع حداکثر درستی تخمین فرکانس آن، از طریق محاسبه تبدیل فوریه گسسته زمان^{۳۴} (DTFT) قله^{۳۵} سیگنال دریافتی محاسبه می‌شود. از آنجایی که محاسبه DTFT در طول سیگنال یک عملیات دشوار بوده، نمونه‌های DTFT با استفاده از تبدیل فوریه گسسته (DFT) محاسبه خواهند شد. با در نظر گرفتن سیگنال ورودی حسگر، فرکانس سیگنال را می‌توان طبق رابطه (۳) محاسبه نمود [۶].

$$\omega = \frac{2\pi}{N(K_p + \delta)} \quad (3)$$

که K_p اندیس قله (اوج) DFT و δ فاصله نقطه K_p تا قله طیف سیگنال ورودی می‌باشد. هدف روش، تخمین δ می‌باشد تا جایی که δ ، نسبت به فاصله‌ی سه نمونه DFT دیگر تا قله کوچکتر از $1/2$ باشد. در مرحله اول N نقطه DFT از سیگنال ورودی به صورت $R[k]$ از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$R[k] = \sum_{n=0}^{n-1} r[n] e^{-j2\pi/Nnk} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $r[n]$ سیگنال مختلط مشاهده شده می‌باشد. هدف از استفاده نمونه‌برداری سه نقطه‌ای DFT حول قله سیگنال ورودی، تخمین δ می‌باشد. در مرحله دوم از روش DFT سه نقطه‌ای، تبدیل فوریه گسسته سه نقطه $K_p - 1$ ، K_p و $K_p + 1$ اطراف قله طیف سیگنال ورودی محاسبه خواهد شد [3]. در رابطه (۵) صرفاً محاسبه $R[K_p]$ آورده شده است، که قابل تعمیم به نقاط دیگر می‌باشد [۶].

$$R[K_p] = A \sum_{n=0}^{n-1} \left(e^{-\frac{j2\pi}{n}\delta n} + \tilde{\omega}[k] \right) = Af(\delta) + \tilde{\omega}[k] \quad (5)$$

که در رابطه (۵)، $\tilde{\omega}[k]$ تبدیل فوریه $\omega[k]$ و A دامنه سیگنال می‌باشد. حال جهت محاسبه نهایی δ از روش جاکوبسن^{۳۶} در [۲۰]، که عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد از رابطه (۶) و برای تخمین نهایی فرکانس سیگنال ورودی، با توجه به δ حاصل شده، از رابطه (۷) می‌توان کمک گرفت.

$$\delta = (\tan(\pi/N)/(\pi/N)) \text{Real}\{(R_{K_p-1} - R_{K_p+1})/(2R_{K_p} - R_{K_p-1} - R_{K_p+1})\} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{N(K_p + \delta)} \quad (7)$$

در مجموع می‌توان گفت که این روش، علاوه بر عملیات و محاسبات کمتر دارای دقت بالاتر و مناسب برای محیط‌های با SNR بالاتر است [۶].

پردازش سیگنال یک ابزار امیدوارکننده برای نسل بعدی شبکه‌های بی سیم و سیستم‌های الکترونیکی می‌باشد. در همین زمینه، روش حداقل مربعات خطا^{۳۷} (LMS) برای اولین بار توسط ویدرو و هوف^{۳۸} در سال ۱۹۶۰ معرفی، و به طور گسترده‌ای به دلیل ساختار ساده و توانمندی بالا در محاسبات استفاده می‌شد [۲۱]. الگوریتم LMS نیز توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار

³²White gaussian noise

³³Discrete time fourier transform

³⁴Peak

³⁵Jacobsen

³⁶Least mean square

³⁷Holf & Widrow

گرفته است و در طول سال‌ها، بسیاری از اصلاحات به آن پیشنهاد شده است. از جمله آن‌ها مقاله [۱۰] می‌باشد، که در سال ۲۰۰۵ بر مبنای فیلتر وقتی مدلی مناسب‌تر برای روش LMS ارائه نموده است [۱۰].

روش LMS ضرایب فیلتر را در یک حلقه مشخص به روز رسانی می‌کند، به طوری که مربع سیگنال خطا به حداقل برسد. به همین جهت است که این روش، روش حداقل مربع خطا یا حداقل میانگین مربعات نامیده شده است. به بیان دیگر می‌توان گفت، سیگنال ورودی پس از دریافت توسط حسگر، در یک حلقه تکرار قرار خواهد گرفت، که در این حلقه، تخمین حاصل شده در هر لحظه با تخمین لحظه قبل به روز رسانی می‌شود، تا زمانی که مربع سیگنال خطا حداقل شود. این عمل در هر تکرار از طریق رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۲۱].

$$\omega_{k+1} = \omega_k - \mu \nabla e^2(n) \quad (8)$$

که در آن μ ، اندازه گام است و ω_k ضرایب فیلتر را مشخص می‌کند. ∇ در رابطه (۸) گرادینان سیگنال خطا نسبت به ضریب فیلتر را نشان می‌دهد [۲۱].

در سال‌های اخیر در بهبود این روش، روش‌هایی همچون $^{39}\text{CLMS}$ [۱۰]، $^{40}\text{ACLMS}$ [۲۲] و $^{41}\text{MLMS}$ [۲۳] ارائه شده است. روش‌های ذکر شده، دارای عملکرد مناسب در شبکه قدرت و همچنین حضور در نوبز بالا را می‌باشند [۲۳].

از جمله روش‌های تخمین فرکانس که در سال‌های اخیر ارائه شده است می‌توان به، روش فیلتر کالمن اشاره نمود [۱۵]. این روش به مدل فضای حالت سیگنال وابسته است. در این روش با حذف نویزهای مزاحم و خطای سیستم و همچنین هارمونیک^{۴۲}‌های موجود در سیگنال ورودی فرکانس سیستم، ردیابی و تخمین زده می‌شود. این روش در سیستم‌های خطی و غیرخطی کاربرد دارد. فیلتر کالمن به دو نوع فیلتر کالمن خطی^{۴۳} و فیلتر کالمن توسعه یافته^{۴۴} تقسیم می‌شود که نوع توسعه یافته آن بیشتر برای توابع غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵]. این الگوریتم جهت تخمین در نوبز بالا به ویژه در سیستم‌های قدرت توانمند می‌باشد [۲۴].

یکی دیگر از روش‌های تخمین فرکانس، الگوریتم حلقه قفل فاز (PLL) می‌باشد. حلقه قفل فاز یک روش اساسی با کاربردهای فراوان در مهندسی برق می‌باشد. ایده اصلی در این روش، تولید یک سیگنال سینوسی است، که فاز آن مولفه اصلی سیگنال ورودی را تقویت می‌کند. به بیان دقیق‌تر روش حلقه قفل فاز، مشابه یک سیستم سروو^{۴۵} است، که فاز سیگنال خروجی را کنترل می‌کند، به گونه‌ای که خطای بین فاز خروجی و فاز ورودی حداقل شود [۱۶].

یکی دیگر از الگوریتم‌های ارائه شده، جهت تخمین پارامترهای شبکه، تکنیک عبور از صفر می‌باشد. روش عبور از صفر می‌تواند برای ردیابی فرکانس در شبکه‌های قدرت استفاده شود، چرا که وجود هارمونیک‌های بسیار در سیگنال شبکه‌های قدرت، نیازمند روشی مناسب جهت شناسایی و تخمین شبکه می‌باشد. به بیان ساده و کلی، این روش به محاسبه تعداد نقاط عبوری از صفر در یک بازه مشخص از سیگنال ورودی می‌پردازد. تخمین نهایی در این روش به کمک محاسبه تبدیل فوریه گسسته و تحلیل عناصر کسینوسی و سینوسی سیگنال ورودی، طی روابطی مشخص محاسبه می‌گردد [۱۷].

³⁸Complex LMS

³⁹Augmented complex LMS

⁴⁰Modified LMS

⁴¹Harmonic

⁴²Linear kalman filter

⁴³Extended kalman filter

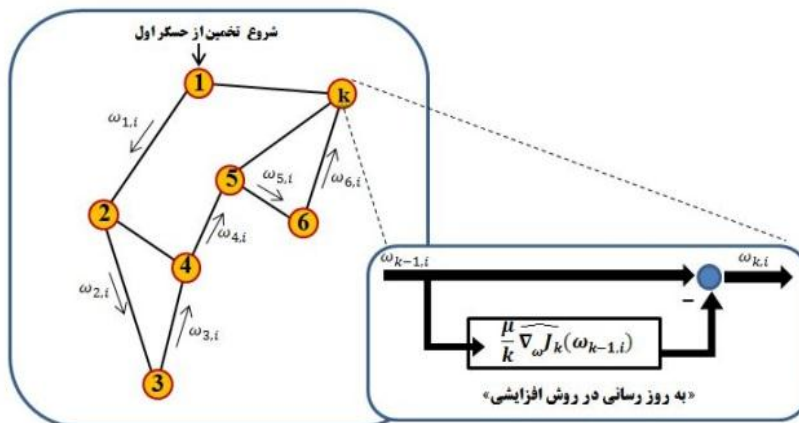
⁴⁴Servo

از جمله روش‌های دیگری که می‌توان اشاره نمود، روش‌هایی همچون موجک بازگشتی، الگوریتم نیوتن، روش‌های شبکه عصبی، روش حداقل مربعات وزندهی شده و همچنین روش‌هایی که از ادغام چند الگوریتم حاصل شده‌اند، می‌باشند. هر کدام از روش‌های ارائه شده، متناسب با شرایط محیطی و نوع سیگنال ورودی و عوامل دیگر می‌بایست انتخاب و بکار گرفته شود.

۲-۲- روش‌های چند حسگره (توزیع یافته)

در شبکه حسگر بی سیم، حسگرها دارای محدودیت‌هایی در تأمین انرژی، پردازش سیگنال و قابلیت‌های ارتباطی هستند. سیگنال ورودی به حسگرها غالباً تحت تأثیر نویز قرار می‌گیرند. محدودیت‌های شبکه منجر به از بین رفتن داده‌های حساس و اصلی سیگنال و یا عدم دسترسی و تخمین صحیح پارامترهای سیگنال خواهد شد. روش‌های توزیع یافته باید برای مقابله با این شرایط نامطلوب به گونه‌ای ارائه شوند، تا بتوانند در شبکه‌های حسگر بی سیم با دقت تخمین بالاتر، کاربری بهتری پیدا نمایند. سه استراتژی کلی برای تخمین توزیع یافته، به شرح زیر وجود دارد [۱۸].

۱) افزایشی: در این استراتژی، یک حلقه در شبکه در نظر گرفته شده و از ابتدای حلقه، حسگر اول تخمین مورد نظر خود را به روز کرده و به حسگر دوم در حلقه تحویل می‌دهد. طبق شکل ۱ این کار به همین صورت ادامه پیدا کرده تا به حسگر آخر در حلقه برسد. یکی از معایب این استراتژی این است که، با از کار افتادن یک حسگر در حلقه، تخمین دچار خطا می‌شود [۱۶]. در استراتژی افزایشی از مدل شبکه و الگوریتم نشان داده شده در شکل ۱ جهت تخمین پارامتر مورد نظر استفاده می‌شود. در حالت کلی الگوریتم این استراتژی به صورت رابطه (۹) می‌باشد [۱۸].

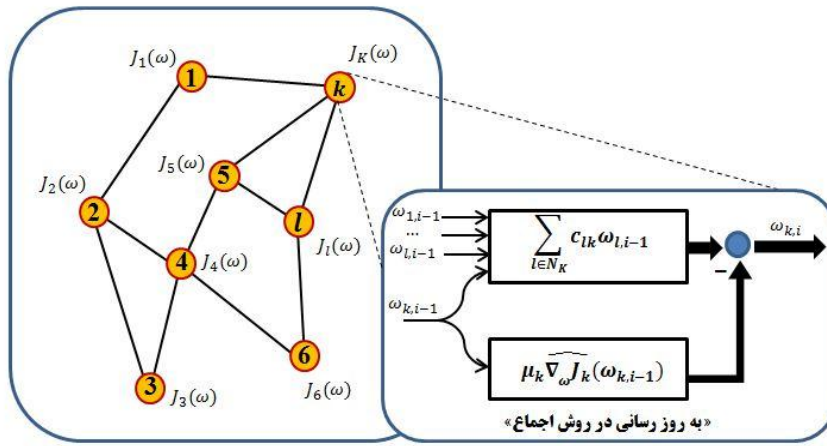


شکل ۱- مدل شبکه و الگوریتم به روز رسانی در استراتژی افزایشی

$$\omega_{k,i} = \omega_{k-1,i} - \frac{\mu}{k} \nabla_{\omega} J_k(\omega_{k-1,i}) \quad (9)$$

که در رابطه (۹) μ ، $\omega_{k,i}$ و k به ترتیب اندازه طول گام، پارامتر تخمین زده شده در لحظه i ام از حسگر k ام و تعداد حسگرها می‌باشد.

۲) اجماع: در این استراتژی، حسگرهای مجاور به یک اجماع از تخمین دست پیدا می‌کنند. در واقع در این استراتژی هر حسگر به طور همزمان بر اساس حداقل یک تابع هزینه مشخص و همچنین از ترکیب تخمین‌های حاصل شده از حسگرهای همسایه، پارامتر مورد نظر را تخمین می‌نماید [۱۸].



شکل ۲- مدل شبکه و الگوریتم به روز رسانی در استراتژی اجماع

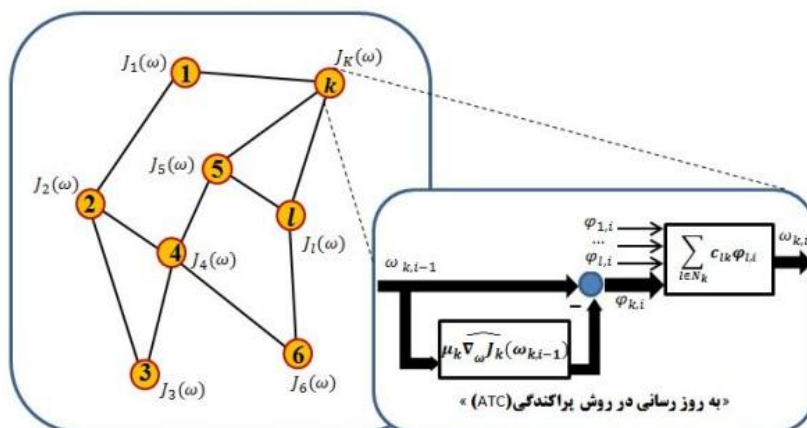
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، الگوریتم به روز رسانی تخمین پارامترهای سیگنال طبق استراتژی اجماع، طی دو مرحله ی ترکیب و به روز رسانی انجام می شود. که دو رابطه (۱۰) و (۱۱) از نتایج خود در هر لحظه، جهت تخمین نهایی پارامتر بهره می گیرند [۱۸].

$$\varphi_{k,i-1} = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \omega_{l,i-1} \quad (10)$$

$$\omega_{k,i} = \varphi_{k,i-1} - \mu_k \nabla_{\omega} J_k(\omega_{k,i-1}) \quad (11)$$

که در رابطه (۱۰) و (۱۱)، c_{lk} بیانگر ضریب ترکیب همسایگی حسگرها، $\varphi_{k,i-1}$ نشان دهنده ترکیب حاصل شده از تخمین حسگرهای همسایه در لحظه $i - 1$ ام می باشد.

۳) پراکندگی: در استراتژی دیگر از روش های توزیع یافته، ابتدا هر حسگر تخمین خود را بر اساس تابع هزینه خود به روز می کند. سپس با پراکندگی تخمین ها از حسگرهای مجاور به یک حسگر، تخمین ها با هم ترکیب می شوند، در واقع ابتدا به روز رسانی و سپس ترکیب (ATC^{۴۶}) انجام می شود. در گونه دیگر از این استراتژی جهت تخمین، ابتدا ترکیب و سپس به روز رسانی (CTA^{۴۷}) انجام می شود [۱۸]. در شکل های ۳ و ۴ مدل شبکه و الگوریتم هر دو استراتژی پراکندگی به تفکیک قابل مشاهده می باشد.



شکل ۳- مدل شبکه و الگوریتم به روز رسانی در استراتژی پراکندگی (ATC)

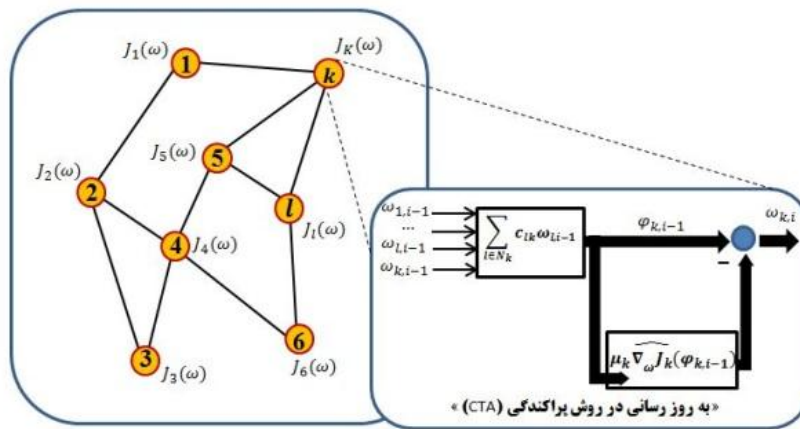
⁴⁵ Adapt-Then-Combine

⁴⁶ Combine-Then-Adapt

در استراتژی به روز رسانی - ترکیب (ATC) از رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) تخمین پارامترها را می‌توان محاسبه نمود [۱۸].

$$\varphi_{k,i} = \omega_{k,i-1} - \mu_k \nabla_{\omega} J_k(\omega_{k,i-1}) \quad (12)$$

$$\omega_{k,i} = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \varphi_{l,i} \quad (13)$$



شکل ۴- مدل شبکه و الگوریتم به روز رسانی در استراتژی پراکنده‌گی (CTA)

از رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) در استراتژی ترکیب - به روز رسانی (CTA) جهت تخمین پارامترهای سیگنال می‌توان استفاده نمود [۱۸].

$$\varphi_{k,i-1} = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \omega_{l,i-1} \quad (14)$$

$$\omega_{k,i} = \varphi_{k,i-1} - \mu \nabla_{\omega} J_k(\varphi_{k,i-1}) \quad (15)$$

در این مقاله هدف، ارائه روش حداقل نورم p خطای توزیع شده (dLMP) جهت تخمین فرکانس توزیع شده می‌باشد. لازم بذکر می‌باشد که به صورت محلی می‌توان در هر حسگر، دامنه و فاز سیگنال ورودی به شبکه را تخمین نمود. بررسی روش پیشنهادی، برای هر سه استراتژی توزیع شده در بخش شبیه سازی، انجام شده است.

با بهره‌گیری از روش‌های تک حسگره، روش‌های بسیاری برای شبکه‌های تک فاز و سه فاز جهت تخمین فرکانس سیگنال توزیع شده، ارائه گردیده است. این در حالیست که بهره‌گیری از روش حداقل مربع خطا و فیلتر کالمن در زمره بیشترین روش‌های مینا، در مقالات ارائه شده در سال‌های اخیر می‌باشد، که می‌توان به مقالات [۲۵-۲۹] اشاره نمود. لذا در ادامه دو روشی که در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ برای تخمین در شبکه تک فاز و سه فاز ارائه گردیده، مختصراً بیان شده است.

روش فیلتر ناچ توزیع شده (dNF^۴) که از روش حداقل مربع خطا در جهت تخمین فرکانس بهره می‌گیرد، یک نمونه از روش‌های توزیع شده می‌باشد [۲۵]. فیلتر ناچ به سیگنال ورودی در هر حسگر به صورت رابطه (۱۶) اعمال می‌شود.

$$Y_k[i] = -\rho a Y_k[i-1] - \rho^2 Y_k[i-2] + X_k[i] + a X_k[i-1] + X_k[i-2] \quad (16)$$

که Y_k ، X_k ، a و ρ به ترتیب خروجی فیلتر ناچ، سیگنال ورودی پارامتر نامعلوم که در رابطه (۱۷) تعریف شده است و پارامتر کمتر و یا نزدیک یک می‌باشد. همانطور که اشاره شد، a پارامتر نامعلوم در شبکه حسگر می‌باشد، لذا هر حسگر قادر به ارزیابی پارامتر a در همسایگی خود است. که برای پارامتر a طبق رابطه (۱۷) خواهیم داشت:

$$a = -2 \cos(\omega_0 T) \quad (17)$$

⁴⁷ Distributed notch filtering

به عبارت دیگر، تخمین فرکانس ω_0 را به تخمین پارامتر a تغییر داده شده است. در هر بار تکرار حلقه i ام از حلقه i ، حسگر k ام به سیگنال گسسته ورودی $X_k[i]$ دسترسی دارد. فیلتر ناچ در حسگر k ام، $Y_k[i]$ را تولید می کند [۲۵]. تخمین پارامتر به این روش را طی دو مرحله، طبق رابطه های (۱۸) و (۱۹) می توان بیان نمود.

$$\varphi_{k,i+1} = a_{k,i} - \mu 2Y_k[i](-\rho Y_k[i-1] + X_k[i-1]) \quad (18)$$

$$a_k(i+1) = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \varphi_l(i+1) \quad (19)$$

که در (۱۹)، c_{lk} بیانگر ضریب ترکیب همسایگی حسگرها و φ_l نشان دهنده تخمین تولید شده توسط حسگر l ام (l همان حسگر همسایه می باشد) در لحظه i ام می باشد. طبق تبدیل فرکانس نسبت به a در رابطه (۱۷)، ابتدا می بایست معکوس این تبدیل را با کمک رابطه (۲۰) جهت تخمین نهایی فرکانس محاسبه نمود. در ادامه روش، برای اینکه بتوان با دیگر حسگرها تخمین را به اشتراک گذاشت، می بایست از رابطه ترکیب (۲۱) استفاده کرد [۲۵].

$$\hat{\omega}_k(i+1) = \frac{1}{T_k} \arccos(-\varphi_k(i+1)/2) \quad (20)$$

$$\omega_k(i+1) = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \hat{\omega}_l(i+1) \quad (21)$$

که T_k در رابطه (۲۰) بیانگر دوره تناوب سیگنال در حسگر k ام می باشد.

روش دیگری که در این بخش می توان معرفی نمود، روش فیلتر کالمن پیشرفته توزیع شده^{۴۹} می باشد. هدف از این روش، ارائه مدلی جهت تخمین فرکانس در فضای حالت سیگنال، برای شبکه های توزیع شده می باشد. این روش مطابق با نیاز شبکه هوشمند برق ارائه شده است. عدم تعادل بین تولید و بار به عنوان یک پیش نیاز برای عملکرد پایدار شبکه برق موجب انحراف فرکانس خواهد شد. لذا اپراتورهای شبکه، به تخمین های سریع و دقیق از فرکانس و سیگنال، برای کنترل و ثبات شبکه نیازمند می باشند [۲۷].

فیلتر کالمن پیشرفته توزیع شده (D-ACKF)، برگرفته از روش به روز رسانی در [۲۸] و روش فیلتر کالمن در [۲۹]، به عنوان نمونه دیگری از روش های تخمین فرکانس توزیع شده، می باشد که، با توجه به آنکه فرکانس در یک منطقه جغرافیایی دارای توزیع یکسان بوده، در حالی که عدم تعادل ولتاژ و همبستگی متقابل حسگرها می تواند متفاوت باشد، این روش ارائه گردیده است [۲۷].

در این مقاله هدف تخمین فرکانس سیگنال تک فاز سینوسی در شرایط نویزی می باشد. در بخش بعد به طور مفصل روش پیشنهادی ارائه شده است.

۳- روش حداقل نورم p خطای توزیع یافته (dLMP)

در روش ارائه شده، یک شبکه از حسگرها، در نظر گرفته شده است. در آن شبکه هر حسگر، سیگنال های سینوسی پراختلالی (با نویز بالا) را به عنوان ورودی حسگر، دریافت می کند. هر حسگر در ارتباط دو طرفه بین خود و همسایگان (ارتباطی که حسگرها می توانند داده ها را برای تخمین بهتر مبادله کنند) قرار دارد. فرآیند تخمین در این روش، چندین بار تکرار شده و در هر بار تکرار، تخمین هر حسگر به روز رسانی خواهد شود. روش پیشنهادی اجازه می دهد تا یک شبکه با کمک همکاری حسگرهای درون شبکه بتواند، پارامترهای مد نظر محیط، به ویژه فرکانس را با دقت و سرعت بالا شناسایی و تخمین نماید.

⁴⁸ Distributed agmented extended kalman filter

روش پیشنهادی مقاله، که از هر سه نوع استراتژی در زمینه تخمین توزیع شده سود برده و آن‌ها را مورد مقایسه قرار داده است، الگوریتم حداقل نرم p خطای توزیع شده (dLMP) می‌باشد. این روش با سرعت سریع همگرایی و دقت بالا، کاربرد بسیاری در شبکه‌های چند حسگر خواهد داشت. مزیت این روش، همگرایی مطلوب و سریع و همچنین حساسیت بالا نسبت به SNR-های بالا می‌باشد. علاوه بر تخمین فرکانس توزیع شده، مزیت دیگر این روش، تخمین دامنه و فاز سیگنال سینوسی به صورت محلی در هر حسگر با همگرایی دقیق و سرعت بالا باشد. در این بخش ابتدا مدل شبکه و مدل کلی تخمین سیگنال را معرفی و سپس روش dLMP برای سه استراتژی توزیع یافته به صورت مجزا، بر اساس مقاله [۱۶] ارائه شده است.

۳-۱- مدل شبکه و روش توزیع یافته

شبکه حسگر از تعداد N گره حسگر مشخص، در یک منطقه جغرافیایی با ساختار تصادفی تشکیل شده است. حسگرها این قابلیت را دارا می‌باشند که، می‌توانند اطلاعات خود را با حسگرهای همسایه (مجاور) از طریق راه‌های ارتباطی موجود، به اشتراک بگذارند. این در حالیتیست که هر حسگر دارای تعدادی از حسگرهای مجاور و در همسایگی خود می‌باشد. ارتباط همسایگی می‌تواند به صورت تمام ارتباطی^{۵۰} بین حسگرها باشد و یا اینکه هر حسگر صرفاً با تعدادی از حسگرها در ارتباط باشد. این موضوع بستگی به ابعاد و شرایط شبکه دارد. به این ترتیب در حالت کلی می‌توان، تعداد همسایگان حسگر k را به صورت N_k مشخص نمود. هدف تخمین فرکانس سیگنال سینوسی به صورت توزیع شده می‌باشد. فرض می‌کنیم که در حسگر k ام، سیگنال گسسته (۲۲) مشاهده شده است.

$$X_k(i) = A_k \cos(\omega_0 iT + \varphi_k) + v_k(i) \quad (22)$$

که در آن A_k ، φ_k ، $v_k(i)$ و T به ترتیب برابر دامنه، فاز اولیه و نویز سیگنال مشاهده شده توسط حسگر k ام و دوره تناوب سیگنال است. سپس با همکاری حسگرهای همسایه و به وسیله اشتراک گذاری تخمین اولیه هر حسگر با حسگرهای همسایه، پارامترهای مشترک مورد نظر تخمین زده می‌شود. بر اساس روش پیشنهادی، می‌توان برای تخمین فرکانس و یا هر پارامتر دیگر از سیگنال مشاهده شده، از رابطه (۲۳) استفاده نمود.

$$\omega_{i+1} = \omega_i - \mu \nabla (|e|^p) \quad (23)$$

که ω فرکانس و یا هر پارامتر مورد نظر دیگر جهت تخمین می‌باشد.

۳-۲- روش LMP توزیع یافته افزایشی

با توجه به شکل ۱ در استراتژی افزایشی، ابتدا یک ساختار چرخه‌ای را تشکیل داده، که تمام حسگرهای درون شبکه را به صورت متوالی (یکی پس از دیگر) پوشش می‌دهد. در این ساختار، حسگرها از ۱ تا k شماره گذاری شده‌اند. در هر لحظه، به روز رسانی به k مرحله افزایشی، به صورت متوالی تقسیم می‌شود. هر مرحله به صورت محلی، به روز رسانی را در یکی از حسگرها انجام داده و به عنوان مقدار اولیه به حسگر بعدی انتقال می‌دهد. ترتیب به روز رسانی طبق رابطه (۲۴) انجام می‌شود.

$$\begin{cases} \text{Step 1: } \omega_{1,i} = \omega_{i-1} - \frac{\mu}{k} \nabla_{\omega} J_1(\omega_{i-1}) \\ \text{Step 2: } \omega_{2,i} = \omega_{1,i} - \frac{\mu}{k} \nabla_{\omega} J_2(\omega_{1,i-1}) \\ \vdots \\ \text{Step N: } \omega_{k,i} = \omega_{k-1,i} - \frac{\mu}{k} \nabla_{\omega} J_k(\omega_{k-1,i-1}) \end{cases} \quad (24)$$

⁴⁹ Fully connected

که در رابطه (۲۴) $\nabla_{\omega} J_k$ و μ ، به ترتیب گرادیان تابع هزینه حسگر k ام نسبت به پارامتر ω و پارامتر اندازه گام می‌باشد. به کمک تابع هزینه با رابطه (۲۵)، می‌توان میانگین سیگنال خطا با توان p ، را حداقل نمود.

$$J_k^{loc}(\omega) = \sum_{i \in N_k} E\{|e_k(i)|^p\} \quad (25)$$

که در آن $e_k(i)$ سیگنال خطای حسگر k ام در لحظه i ام می‌باشد. سیگنال $e_k(i)$ سیگنال خطای محاسبه شده در هر بار به روز رسانی حلقه تکرار می‌باشد. رابطه سیگنال خطا را می‌توان به صورت (۲۶) نشان داد.

$$e_k(i) = d_k(i) - \hat{A}_k \cos(\hat{\omega}_k iT + \hat{\phi}_k) \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، $d_k(i)$ خروجی مورد نظر (مطلوب) و سیگنال ورودی به حسگر k ام را نشان می‌دهند. $\hat{\phi}_k$ ، $\hat{\omega}_k$ ، \hat{A}_k به ترتیب دامنه، فرکانس و فاز تخمین زده شده، می‌باشند. لازم بذکر است که دامنه و فاز به صورت محلی تخمین شده‌اند. جهت محاسبه گرادیان رابطه (۲۴) می‌توان از رابطه (۲۷) کمک گرفت.

$$\nabla_{\hat{\omega}_{k,i}}(|e_k(i)|^p) = p \cdot \text{sgn}(e_k(i)) \cdot |e_k(i)|^{p-1} \cdot \nabla_{\hat{\omega}_{k,i}}(e_k(i)) \quad (27)$$

مشتق سیگنال خطا بر حسب فرکانس به صورت رابطه (۲۸) بدست می‌آید.

$$\nabla_{\hat{\omega}_{k,i}}(e_k(i)) = \hat{A}_{k,i} iT \sin(\hat{\omega}_{k,i} iT + \hat{\phi}_{k,i}) \quad (28)$$

رابطه کلی را برای تخمین آخرین حسگر در چرخه، با فرض اینکه حسگر k ام آخرین حسگر در چرخه باشد می‌توان، به صورت رابطه (۲۹) معرفی نمود. رابطه (۲۹) قابل تعمیم برای تمام حسگرها می‌باشد.

$$\hat{\omega}_{k,i} = \hat{\omega}_{k-1,i} - \frac{\mu \cdot p}{k} \cdot \text{sgn}(e_k(i)) \cdot |e_k(i)|^{p-1} \cdot \hat{A}_{k,i} iT \sin(\hat{\omega}_{k,i} iT + \hat{\phi}_{k,i}) \quad (29)$$

همانطور که گفته شد، در صورت نیاز به تخمین فاز و دامنه به صورت محلی در هر لحظه، هر حسگر به صورت مجزا می‌تواند از طریق روابط (۳۰) و (۳۱) به کمک رابطه گرادیان گیری (۲۷) محاسبه شوند.

$$\hat{A}_{k,i} = \hat{A}_{k,i-1} + \mu_A \cdot p \cdot \text{sgn}(e_k(i)) \cdot |e_k(i)|^{p-1} \cdot \cos(\hat{\omega}_{k,i} iT + \hat{\phi}_{k,i}) \quad (30)$$

$$\hat{\phi}_{k,i} = \hat{\phi}_{k,i-1} - \mu_{\phi} \cdot p \cdot \text{sgn}(e_k(i)) \cdot |e_k(i)|^{p-1} \cdot \hat{A}_{k,i} \sin(\hat{\omega}_{k,i} iT + \hat{\phi}_{k,i}) \quad (31)$$

که μ_A و μ_{ϕ} به ترتیب اندازه گام برای تخمین دامنه و فاز می‌باشند. در این استراتژی اطلاعات تخمین شده از حسگر اول، در طول مسیر چرخه‌ای به سایر حسگرها منتقل شده، تا همه حسگرها تخمین حسگر اول را مشاهده و به ترتیب تقویت نمایند. این روند چرخشی متناسب با تعداد حلقه تکرار، تا همگرایی روش ادامه می‌یابد.

در تفسیر رابطه (۲۴) می‌توان گفت که، تخمین در حسگر اول با ω_{i-1} به عنوان مقدار اولیه شروع می‌شود و آن را به ω_1 به روز می‌کند. سپس حسگر دوم، تخمین ω_1 را در لحظه i ام از حسگر اول را دریافت کرده و آن را به ω_2 به روز می‌نماید. به طور کلی در این استراتژی، حسگر k ام یا به تعبیر دیگر حسگر آخر در چرخه افزایشی، تخمین اولیه $\omega_{k-1,i}$ خود را در لحظه i ام، از حسگر قبل از خود (حسگر $k-1$ ام) استفاده می‌نماید. در نهایت تخمین نهایی در چرخه افزایشی، از حسگر k ام، در لحظه i ام بدست می‌آید.

استراتژی افزایشی هر چند که در میان روش‌های توزیع یافته به شمار می‌آید، اما به دلایلی نمی‌توان آن را توزیع شده کامل، بیان نمود. از جمله محدودیت‌های این استراتژی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- ۱) استراتژی افزایشی حساس به حسگرها و همچنین ترتیب میان آنها است. که از چرخه خارج شدن یک حسگر و یا عوامل دیگر سبب خطا در تخمین نهایی می شود.
- ۲) تعیین یک ساختار و مسیر چرخه‌ای که همه حسگرها را در بر گیرد، ممکن است با مشکل همراه باشد.
- ۳) برای هر تکرار i ام، لازم است مراحل افزایشی به منظور به روز رسانی ω_{i-1} به ω_i از طریق تمام حسگرها به طور کامل انجام شود. این بدین معنی است که، پردازش در حسگرها باید به اندازه کافی سریع باشد، تا مراحل به روز رسانی تمام k حسگر درون شبکه، در هر حلقه تکرار، قبل از شروع چرخه بعدی به پایان برسد.
- با توجه به محدودیت‌های ذکر شده، دو استراتژی دیگر در ادامه بررسی شده‌اند. هدف از دو استراتژی دیگر انعطاف پذیری و قابلیت توزیع یافتگی بالا در آنهاست. در واقع در استراتژی اجماع و پراکندگی بر خلاف استراتژی افزایشی، هیچ دلیلی وجود ندارد که حسگرها فقط باید تخمین‌ها را از یک همسایه دریافت کنند و اطلاعات را تنها به یک همسایه دیگر منتقل کنند. همچنین هیچ دلیلی وجود ندارد که حسگرها بتوانند به طور همزمان با عوامل دیگر هماهنگ شوند. در واقع نیازی نیست که حسگرها منتظر بمانند تا چرخه تکمیل شود و به ترتیب نوبت تخمین آنها فرارسد، بلکه در هر لحظه حسگرها به صورت مجزا، با ترکیب و به روز رسانی، تخمین نهایی را انجام می‌دهند. در نتیجه با تمام محدودیت‌های ذکر شد در این مقاله، استراتژی افزایشی برای پیاده سازی روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. روش ارائه شده با استراتژی افزایشی در یک نگاه به صورت جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- روش حداقل نورم p خطا با استراتژی افزایشی در یک نگاه

پیاده سازی الگوریتم dLMP افزایشی در یک نگاه
گام اول (تعیین ساختار شبکه و چرخه افزایشی): طراحی و تعیین ساختار شبکه و ترتیب قرار گرفتن حسگرها درون شبکه گام دوم (تعیین مقدار اولیه): تعیین و معرفی مقادیر اولیه $\mu, A, T, i, \varphi, \omega$ به ترتیب اندازه گام، تعداد لحظات (تکرار حلقه)، دوره تناوب، دامنه، فاز و فرکانس، برای همه k حسگر شبکه بی سیم گام سوم (به روز رسانی): به روز رسانی با توجه به تعداد و ترتیب حسگرها، جهت تخمین فرکانس سیگنال ورودی برای تمام شبکه به صورت روابط زیر
$\hat{\omega}_{1,i} = \hat{\omega}_{1,i-1} - \frac{\mu \cdot p}{k} \cdot \text{sgn}(e_1(i)) \cdot e_1(i) ^{p-1} \cdot \hat{A}_{1,i} i T \sin(\hat{\omega}_{1,i} i T + \hat{\varphi}_{1,i})$ $\hat{\omega}_{2,i} = \hat{\omega}_{1,i} - \frac{\mu \cdot p}{k} \cdot \text{sgn}(e_2(i)) \cdot e_2(i) ^{p-1} \cdot \hat{A}_{2,i} i T \sin(\hat{\omega}_{2,i} i T + \hat{\varphi}_{2,i})$ \vdots $\hat{\omega}_{k,i} = \hat{\omega}_{k-1,i} - \frac{\mu \cdot p}{k} \cdot \text{sgn}(e_k(i)) \cdot e_k(i) ^{p-1} \cdot \hat{A}_{k,i} i T \sin(\hat{\omega}_{k,i} i T + \hat{\varphi}_{k,i})$

۳-۳- روش LMP توزیع یافته اجماع

با توجه به شکل ۲، در حالت کلی می‌توان گفت، استراتژی اجماع از دو قسمت ترکیب و به روز رسانی تشکیل می‌شود. قسمت اول این استراتژی، تخمین اولیه حسگر k ام توسط ω_{k-1} که از ترکیب و همکاری با سایر حسگرها حاصل می‌شود، آورده شده است. از طرفی در قسمت دوم، به روز رسانی در هر حسگر با توجه به تخمین لحظه قبل خود، به صورت محلی صورت می‌گیرد. به این ترتیب حلقه تکرار اجماع در حسگر k ام توسط رابطه (۳۲) بدست می‌آید، که قابل تعمیم به سایر حسگرهای درون شبکه می‌باشد.

$$\hat{\omega}_{k,i} = \hat{\varphi}_{k,i-1} - \mu \nabla_{\omega} J_k(\hat{\omega}_{k,i-1}) \quad (32)$$

در رابطه (۳۲)، $\hat{\varphi}_{k,i-1}$ قسمت اول یا همان، تخمین اولیه استراتژی که از ترکیب با سایر حسگرهای همسایه بدست آمده است، می باشد. در قسمت دوم، به روز رسانی حسگر در لحظه i ام به صورت محلی انجام شده است که، μ و $\nabla_{\omega} J_k$ به ترتیب اندازه گام به روز رسانی و گردایان تابع هزینه حسگر k ام می باشد. تابع هزینه در نظر گرفته شده، همانند تابع هزینه استراتژی افزایشی مطابق رابطه (۲۵) می باشد. لذا به صورت مجزا قسمت اول استراتژی اجماع طبق رابطه (۳۳) و برای قسمت دوم طبق رابطه (۳۴) محاسبه می شود.

$$\hat{\varphi}_{k,i-1} = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \hat{\omega}_{l,i-1} \quad (32)$$

$$\hat{\omega}_{k,i} = \hat{\varphi}_{k,i-1} - \mu \nabla_{\omega} J_k(\hat{\omega}_{k,i-1}) \quad (34)$$

که در رابطه (۳۳)، c_{lk} ضرایب غیر منفی ارتباط همسایگی و $\hat{\omega}_{l,i-1}$ پارامتر تخمین شده توسط حسگر مجاور (حسگر l ام) می باشد. گردایان رابطه (۳۴) را می توان به صورت زیر در رابطه (۳۵) استفاده نمود.

$$\hat{\omega}_{k,i} = \varphi_{k,i-1} - \mu \frac{\mu \cdot p}{k} \cdot \text{sgn}(e_l(i)) \cdot |e_l(i)|^{p-1} \cdot \hat{A}_{l,i} iT \sin(\hat{\omega}_{l,i} iT + \hat{\varphi}_{l,i}) \quad (35)$$

به صورت کلی تخمین در استراتژی اجماع در هر تکرار i ، توسط حسگر k ام طی دو قسمت، اما به صورت همزمان انجام می شود، که در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- روش حداقل نورم p خطا با استراتژی اجماع در یک نگاه

پیاده سازی الگوریتم dLMP اجماع در یک نگاه
گام اول (تعیین مقدار اولیه): تعیین و معرفی مقادیر اولیه μ, i, T, A, φ و ω به ترتیب اندازه گام، تعداد لحظات (تکرار حلقه)، دوره تناوب، دامنه، فاز و فرکانس، برای همه k حسگر شبکه بی سیم گام دوم (به روز رسانی و ترکیب): به روز رسانی و ترکیب جهت تخمین پارامتر فرکانس برای حسگر k به صورت همزمان به کمک روابط زیر
$\hat{\varphi}_{k,i-1} = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \hat{\omega}_{l,i-1}$ $\hat{\omega}_{k,i} = \hat{\varphi}_{k,i-1} - \mu \nabla_{\omega} J_k(\hat{\omega}_{k,i-1})$

۳-۴- روش LMP توزیع یافته پراکنده

با در نظر گرفتن شکل ۳ و ۴ پیداست که، استراتژی پراکنده شامل دو نوع می باشد.

(۱) اول به روز رسانی و سپس ترکیب (ATC)

(۲) اول ترکیب و سپس به روز رسانی (CTA)

لذا در ادامه استراتژی پراکنده شرح داده شده است. با توجه به سیگنال ورودی حسگر k ام، روش ارائه شده برای تخمین پارامترهای سیگنال در هر بار تکرار حلقه، از تابع هزینه رابطه (۳۶) جهت حداقل کردن سیگنال خطا با توان p ، استفاده می کند.

$$J_k^{loc}(\omega) = \sum_{l \in N_k} c_{lk} E\{|e_l(i)|^p\} \quad (36)$$

هنگامی که خروجی همگرا می شود، به این معنی است که تخمین پارامتر حسگر k ام به سیگنال مطلوب همگرا شده است. سیگنال $e_l(i)$ سیگنال خطای محاسبه شده در هر بار به روز رسانی حلقه تکرار می باشد. رابطه سیگنال خطا را می توان به صورت (۳۷) نشان داد.

$$e_l(i) = d_l(i) - \hat{A}_l \cos(\hat{\omega}_l iT + \hat{\phi}_l) \quad (37)$$

در رابطه (۳۷) $\hat{\phi}_l$ ، $\hat{\omega}_l$ ، \hat{A}_l به ترتیب دامنه، فرکانس و فاز تخمین زده شده، می‌باشند. لازم به یاد آوری می‌باشد که، دامنه و فاز در صورت نیاز به شیوه محلی توسط هر حسگر جداگانه محاسبه می‌شود. حال به کمک روابط (۳۸) تا (۴۰)، به عنوان روابط به روز رسانی تخمین در حلقه تکرار مشخص i ، می‌توان هر سه پارامتر فرکانس، دامنه و فاز را شناسایی کرد.

$$\hat{A}_{k,i+1} = \hat{A}_{k,i} - \mu_A \nabla_{\hat{A}_{k,i}} (J_k^{loc}(\omega)) \quad (38)$$

$$\hat{\phi}_{k,i+1} = \hat{\phi}_{k,i} - \mu_\phi \nabla_{\hat{\phi}_{k,i}} (J_k^{loc}(\omega)) \quad (39)$$

$$\hat{\omega}_{k,i+1} = \hat{\omega}_{k,i} - \mu_\omega \nabla_{\hat{\omega}_{k,i}} (J_k^{loc}(\omega)) \quad (40)$$

که در روابط بالا μ_A ، μ_ϕ و μ_ω پارامتر اندازه گام به ترتیب برای، دامنه، فاز و فرکانس، در مرحله به روز رسانی این روش می‌باشند، که بر اساس همگرا شدن و رابطه (۴۱) زیر تعیین می‌شود.

$$0 < \mu < \frac{2}{P_{in}} \quad (41)$$

که در آن، P_{in} به میانگین توان ورودی اشاره می‌کند. بر این اساس μ کوچکتر، بیانگر طولانی بودن زمان دریافت ورودی‌ها با حداقل خطای آن می‌باشد. گردایان تابع هزینه در رابطه (۴۰)، بر حسب فرکانس سیگنال، طبق روابط (۴۲) محاسبه می‌شود.

$$\nabla_{\hat{\omega}_{k,i}} |e_l(i)|^p = p \cdot \text{sgn}(e_l(i)) \cdot |e_l(i)|^{p-1} \cdot \nabla_{\omega_{k,i}} e_l(i) \quad (42)$$

در رابطه (۴۲) می‌توان مشتق سیگنال خطا را بر حسب فرکانس، از رابطه (۴۳) استخراج نمود.

$$\nabla_{\omega_{k,i}} (e_l(i)) = \hat{A}_{l,i} iT \sin(\hat{\omega}_{l,i} iT + \hat{\phi}_{l,i}) \quad (43)$$

تا این مرحله هر حسگر، با روش به روز رسانی تخمین از رابطه (۴۰)، به عنوان گام اول توانسته است به تخمینی نسبتاً دقیق، حول مقدار واقعی فرکانس سیگنال ورودی دست یابد. حال این را می‌توان به صورت رابطه (۴۴) بسط داد.

$$\hat{\phi}_{k,i+1} = \hat{\omega}_{k,i} - \mu_\omega \cdot p \cdot \text{sgn}(e_l(i)) \cdot |e_l(i)|^{p-1} \cdot \hat{A}_{l,i} iT \sin(\hat{\omega}_{l,i} iT + \hat{\phi}_{l,i}) \quad (44)$$

همان طور که در اول بخش گفته شد، گام دوم در استراتژی ATC، مرحله ترکیب یا اشتراک گذاری اطلاعات با همسایگان عنوان کرد. در این مرحله با اشتراک گذاری تخمین‌های حاصله هر حسگر در گام اول، با حسگرهای مرتبط و همسایه، منجر به تولید تخمین نهایی و دقیق تر در شبکه توزیع یافته (چند حسگره) خواهد شد. برای این مرحله از رابطه (۴۵) کمک گرفته می‌شود.

$$\hat{\omega}_{k,i+1} = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \hat{\phi}_{k,i+1} \quad (45)$$

که در آن $\hat{\omega}_{l,r}$ و $\hat{\phi}_{l,r}$ به ترتیب دامنه، فاز و فرکانس تخمین شده اولیه حسگر همسایه می‌باشد. مجدد یادآوری می‌شود که، دامنه و فاز هر حسگر به صورت محلی تخمین زده می‌شود. روش پیشنهادی با توان p در محاسبات ارائه گردید. این در حالیست که برای تخمین فاز و دامنه مشابه روابط (۳۰) و (۳۱) محاسبه می‌شود، چرا که تابع هزینه جهت محاسبه محلی دامنه و فاز همچون دو استراتژی قبل طبق رابطه (۲۵) می‌باشد.

به طور کلی استراتژی ATC برای روش ارائه شده، برای هر حسگر، در دو مرحله به صورت زیر می‌توان ارائه نمود. مرحله اول، تخمین اولیه و به روز رسانی فرکانس می‌باشد. در این مرحله تخمین فرکانس، به کمک روش تک حسگره حداقل نورم p خطا در هر حسگر، از طریق رابطه (۴۴) حاصل می‌شود. مرحله دوم، بهره‌گیری از رابطه ترکیب (اشتراک گذاری) با

تخمین حاصل شده از حسگرهای همسایه خواهد بود. این مرحله جهت رسیدن به همگرایی بیشتر و دقیق تر حسگر k ام می باشد، که از رابطه (۴۵) استفاده می شود.

جدول ۳- روش حداقل نورم p خطا با استراتژی پراکندگی (ATC) در یک نگاه

پیاده سازی الگوریتم dLMP پراکندگی (ATC) در یک نگاه
گام اول (تعیین مقدار اولیه): تعیین و معرفی مقادیر اولیه $\mu, \mathbf{t}, A, T, \boldsymbol{\varphi}$ و $\boldsymbol{\omega}$ به ترتیب اندازه گام، تعداد لحظات (تکرار حلقه)، دوره تناوب، دامنه، فاز و فرکانس، برای همه k حسگر شبکه بی سیم گام دوم (به روز رسانی): تخمین پارامتر فرکانس برای حسگر k به صورت مستقل به کمک رابطه زیر
$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_{k,i+1} = \hat{\boldsymbol{\omega}}_{k,i} - \mu_{\omega} \nabla_{\hat{\boldsymbol{\omega}}_{k,i}} J_k^{loc}(\boldsymbol{\omega}_{k,i})$
گام سوم (اشتراک گذاری): ترکیب تخمین حاصل شده از مرحله به روز رسانی حسگر k ام با سایر حسگرهای همسایه به کمک روابط زیر
$\hat{\boldsymbol{\omega}}_{k,i+1} = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \hat{\boldsymbol{\varphi}}_{l,i+1}$

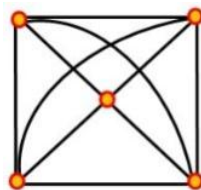
از شرح و بسط دادن استراتژی پراکندگی نوع CTA بعلت طولانی شدن مقاله، صرف نظر کرده و صرفاً به این نکته بسنده می کنیم که در نوع CTA ابتدا ترکیب و سپس به روز رسانی انجام خواهد شد. با توجه به روش ارائه شده در بخش نتایج شبیه سازی، شاهد نتایج مقایسه آن با سایر روش های تک حسگره و چند حسگره مشابه خواهیم بود. ضمناً روش حداقل نورم p خطا توزیع شده را در سه استراتژی توزیع یافته مورد بررسی قرار خواهیم داد.

۴- نتایج شبیه سازی

بر اساس روش پیشنهادی و ارائه شده، آزمایش های مختلفی برای ارزیابی عملکرد این روش انجام شده است. روش ارائه شده به عنوان روش حداقل نورم p خطای توزیع شده نامگذاری شده است. آزمایش های انجام شده در دو مقدار، $p = 2$ که معمولاً به عنوان حداقل مربع خطا (LMS) و $p = 4$ معمولاً حداقل میانگین چهارم خطا (حداقل میانگین مکعب خطا) (LMF) شناخته می شوند، اجرا شده اند.

همانطور که اشاره شد، روش پیشنهادی جهت تخمین فرکانس توزیع یافته، به عنوان پارامتر مشترک میان حسگرهای درون شبکه ارائه شده است. لذا در شبیه سازی انجام شده، روش پیشنهادی با روش های مشابه تک حسگره و توزیع یافته ای همچون، تبدیل فوریه سه نقطه ای، حداکثر درست نمایی، حداقل مربع خطا و حداقل نورم p خطا تک حسگره و همچنین روش فیلتر ناچ توزیع یافته، جهت تخمین فرکانس توزیع شده مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. همچنین این روش در سه استراتژی توزیع یافته، شبیه سازی و مورد مقایسه قرار گرفته است. در روش پیشنهادی قابلیت تخمین فاز و دامنه بصورت محلی، طبق توضیحات و روابط اثبات شده در بخش های قبل، همزمان با تخمین فرکانس توزیع یافته را دارا می باشد.

شبیه سازی انجام شده در محیط برنامه نویسی Matlab با استفاده از فرکانس نمونه برداری 500 Hz انجام شده است. هر آزمایش از شبیه سازی، ۱۰۰ بار تکرار شده است. سیگنال مطلوب به عنوان سیگنال ورودی به شبکه با فاز، دامنه و فرکانس به ترتیب $\frac{\pi}{2}$ ، ۵ و 50 Hz در نظر گرفته شده است. شبکه حسگر طراحی شده در این شبیه سازی با ۵ حسگر مدل شده است، که تمامی این حسگرها با ساختاری توزیع شده، به طور یکسان با هم در ارتباط می باشند. شکل ۵ مدل شبکه حسگر توزیع شده.



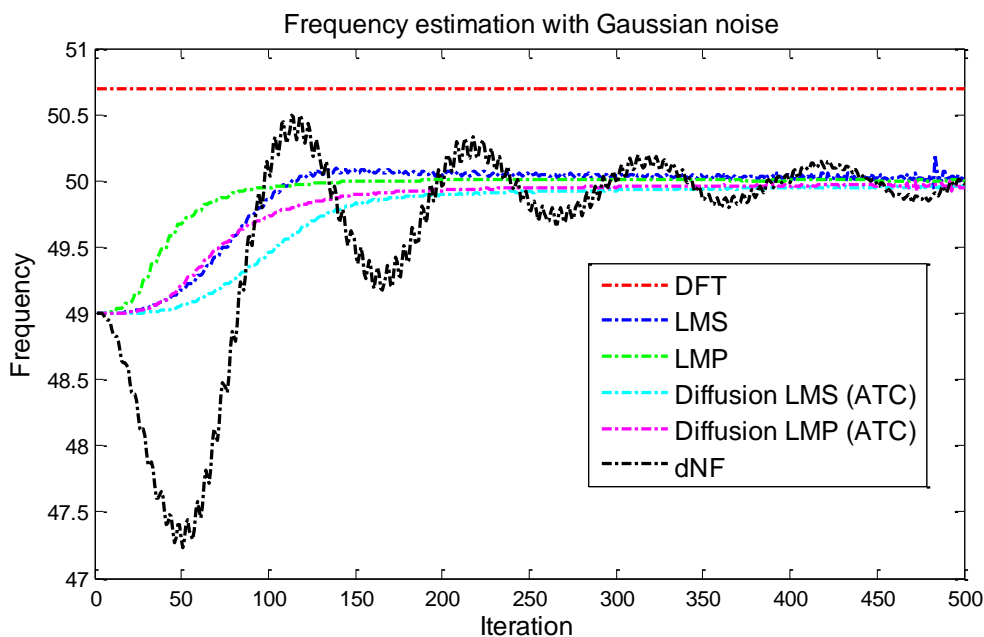
شکل ۵- مدل شبکه حسگر توزیع شده

در کلیه آزمایش‌های انجام شده، برای محاسبه ماتریس عملکرد، خطای مربع میانگین (MSE) فرکانس استفاده شده است، که به صورت رابطه (۴۶) تعریف می‌شود.

$$MSE = \frac{1}{K} \sum_{K=1}^K \frac{1}{K} (f_0 - \hat{f}_0)^2 \quad (46)$$

که در رابطه (۴۶)، $K=100$ ، f_0 به عنوان مقدار اولیه فرکانس و همچنین \hat{f}_0 ، بیانگر مقدار تخمین شده فرکانس می‌باشند. به طور کلی دو نوع آزمایش، آزمایش مقایسه با کلیه روش‌های تک حسگره و توزیع شده مشابه (فیلتر ناچ توزیع شده) و همچنین آزمایش مقایسه بین استراتژی‌های توزیع یافته معرفی شده، انجام گرفته است. هر آزمایش به صورت مجزا، به دو آزمایش با حضور نویز گوسی و همچنین با حضور نویز ضربه‌ای^{۵۱} تفکیک شده است. در مجموع چهار آزمایش در این مقاله برای صحت و بررسی روش ارائه شده، مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.

آزمایش (۱) در آزمایش اول، نویز به صورت گوسی و با واریانس نویز برابر $0.1 (\sigma^2 = 0.1)$ در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی، فرکانس نمونه برداری برابر 500 و 700 Hz تکرار برای الگوریتم‌ها در نظر گرفته شده است. μ برای هر روش به صورتی در نظر گرفته شده است، که در 700 تکرار به همگرایی برسد. هدف در آزمایش اول مقایسه و بررسی روش ارائه شده با روش‌های تک حسگره و توزیع شده مشابه می‌باشد. در شکل ۶ نمودار همگرایی روش‌های مورد مقایسه، آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روش پیشنهاد شده LMP دارای همگرایی سریعتری نسبت به بقیه روش‌هاست.



شکل ۶- نمودار همگرایی و تخمین فرکانس با نویز گوسی

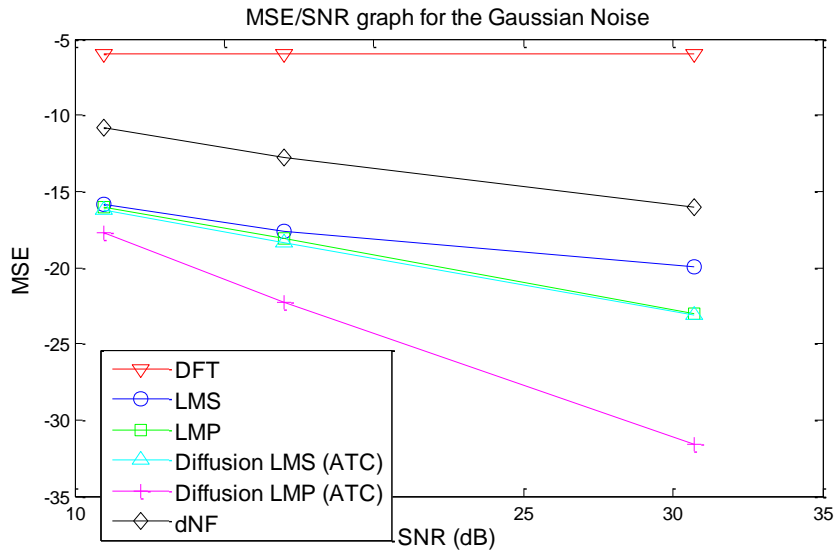
در شکل ۷ نمودار MSE^2 بر حسب سیگنال به نویز در هر روش نشان داده شده است. برای محاسبه سیگنال به نویز (SNR) های متفاوت، از دامنه‌های مختلف استفاده شده است، که به صورت رابطه (۴۷) محاسبه شده است.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{A^2}{2\sigma^2} \right) \quad (47)$$

⁵⁰ Impulse noise

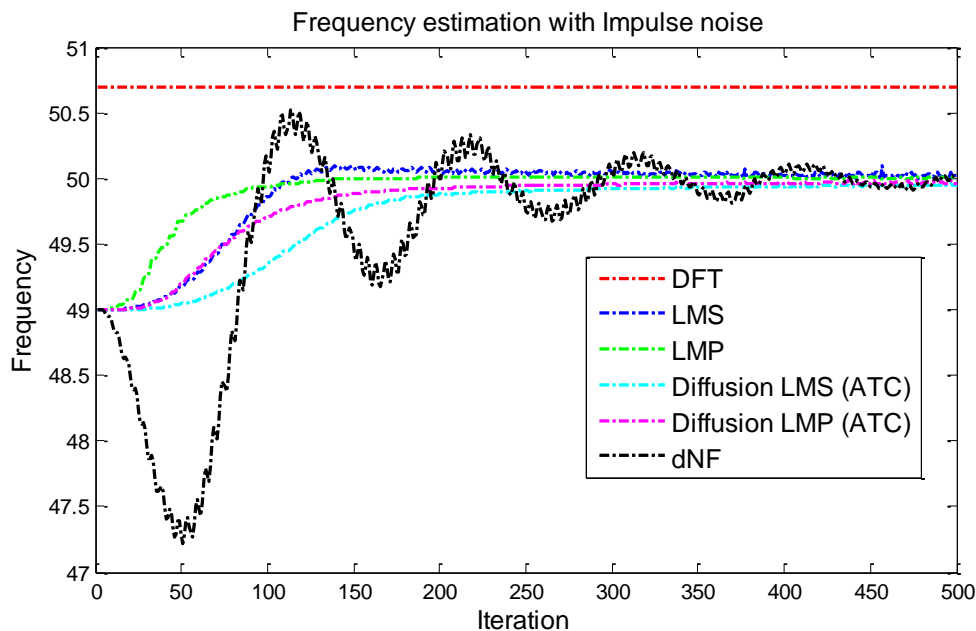
⁵¹ Mean square error

که A بیانگر دامنه سیگنال و σ^2 واریانس نویز ($\sigma^2 = 0.1$) می باشد. SNR شبیه سازی شده از 10 dB تا 30 dB در نظر گرفته شده است. همانطور که از شکل پیداست، در سیگنال به نویزهای بالا، روش پیشنهادی توزیع شده LMP با $p = 4$ از همه بهتر است.



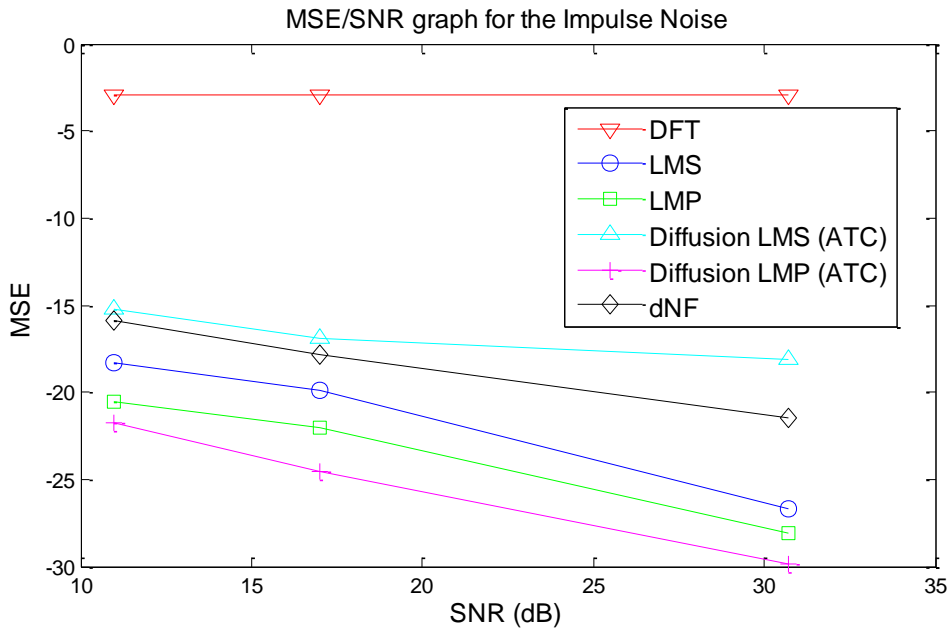
شکل ۷- نمودار MSE بر حسب SNR در حالت نویز گوسی

آزمایش ۲) در آزمایش دوم، نویز ضربه‌ای به صورت برنولی 5^3 -گوسی با ۱۰ درصد نمونه‌های ضربه‌ای در نظر گرفته شده است. همچون آزمایش قبل، آزمایش دوم در فرکانس نمونه برداری 500 Hz و با ۷۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. μ برای هر روش به گونه‌ای در نظر گرفته شده، تا در ۷۰۰ تکرار، به همگرایی برسد. در شکل ۸ نمودار همگرایی فرکانس توزیع یافته روش ارائه شده با روش‌های تک حسگره و توزیع شده مشابه همچون آزمایش اول قابل مشاهده و بررسی می باشد. چنانکه مشاهده می شود، روش پیشنهادی LMP دارای سرعت همگرایی بیشتری نسبت به سایر روشهاست.



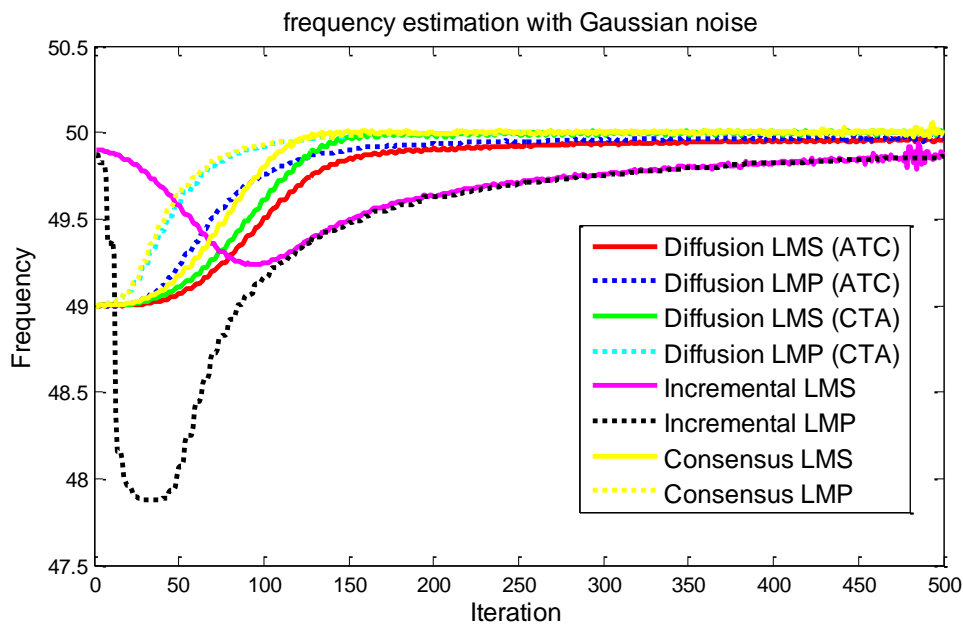
شکل ۸- نمودار همگرایی و تخمین فرکانس با نویز ضربه‌ای

در شکل ۹، نمودار خطی بر حسب سیگنال به نویز، برای هر روش نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست، روش LMP تک حسگر و LMP توزیع شده با $p = 4$ ، در سیگنال به نویزهای بررسی شده، دارای شرایط بهتری نسبت به سایر روشها می باشد.



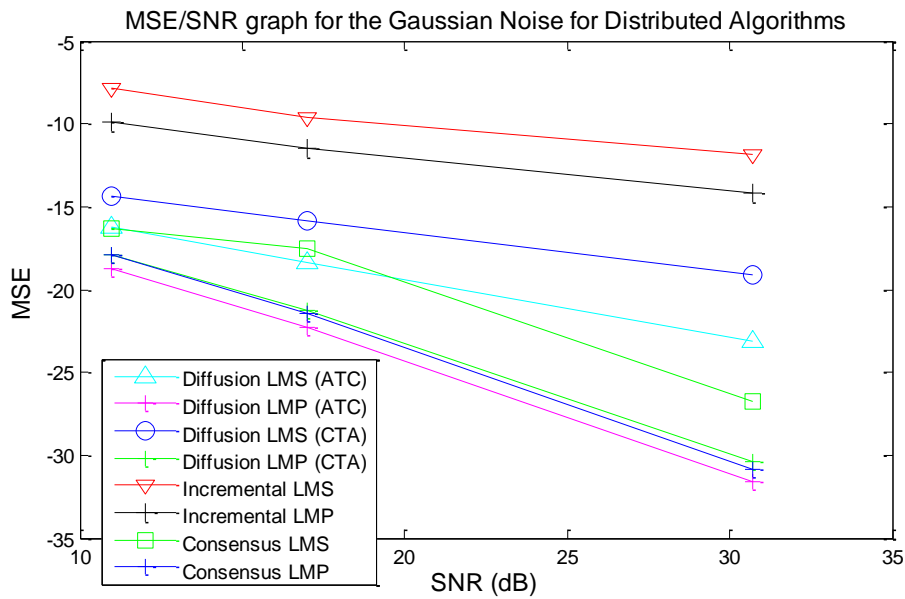
شکل ۹- نمودار MSE بر حسب SNR در حالت نویز ضربه ای

آزمایش سوم) در این آزمایش نویز در نظر گرفته شده، نویز گوسی و با واریانس نویز برابر 0.1 ($\sigma^2 = 0.1$) می باشد. تمام شرایط نمونه برداری و شبیه سازی همچون آزمایش های قبل در نظر گرفته شده اند. این آزمایش قصد دارد، مقایسه ای از روش ارائه شده، میان استراتژی های توزیع شده (افزایشی، اجماع و پراکندگی)، با $p = 2$ و $p = 4$ داشته باشد. در شکل ۱۰ نمودار همگرایی فرکانس تخمین زده شده، قابل مشاهده می باشد. همانطور که مشخص است، استراتژی اجماع از نوع LMP دارای بیشترین سرعت همگرایی است.



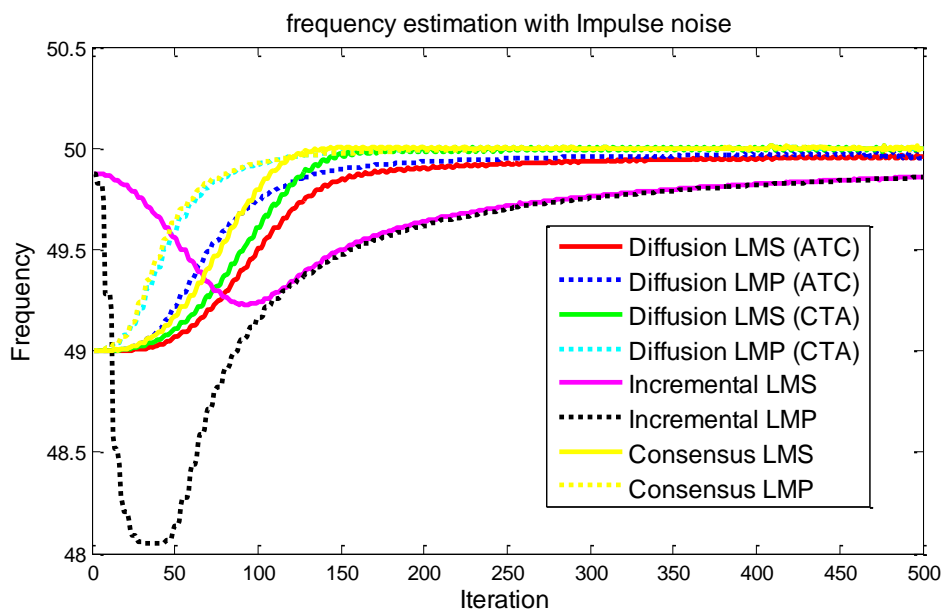
شکل ۱۰- نمودار همگرایی و تخمین فرکانس توزیع شده با نویز گوسی

در شکل ۱۱ نمودار خطا بر حسب سیگنال به نویز روش های مورد مقایسه در این آزمایش را نشان می دهد. همانطور که می بینیم، استراتژی پراکندگی از نوع LMP دارای کمترین خطا است.



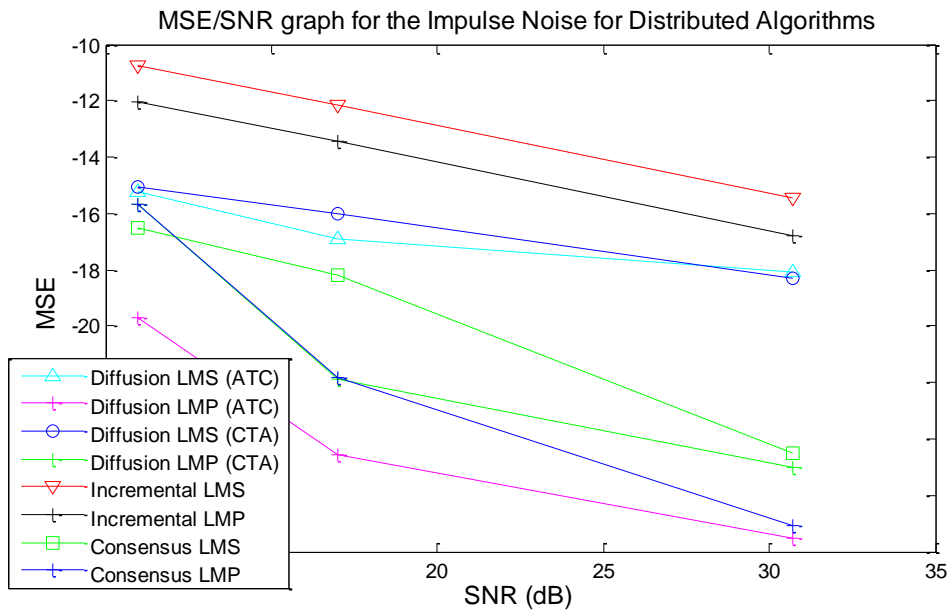
شکل ۱۱- نمودار MSE بر حسب SNR روش های توزیع یافته در حالت نویز گوسی

همانطور که از شکل ۱۱ پیداست، روش های LMP توزیع شده نوع ATC، LMP توزیع شده نوع CTA و LMP توزیع شده نوع اجماع، نسبت به سایر روش ها دارای وضعیت مطلوب و بهتری می باشند. در بین این روش ها با اختلاف کم، روش LMP توزیع شده نوع ATC در $SNR > 12dB$ وضعیت بهتری را نسبت به دو روش دیگر دارا می باشد. آزمایش چهارم) در این آزمایش همچون آزمایش دوم، نویز ضربه ای به صورت برنولی-گوسی با ۱۰ درصد نمونه های ضربه ای در نظر گرفته شده است. تمام شرایط نمونه برداری و شبیه سازی همچون آزمایشات قبل در نظر گرفته شده اند. این آزمایش قصد دارد تا همچون آزمایش سوم، مقایسه ای بین روش های آن آزمایش اما در حضور نویز ضربه ای انجام دهد. در شکل ۱۲ نمودار همگرایی روش ها قابل مشاهده می باشد. در این حالت نیز نتایج مشابه حالت نویز گوسی به دست آمده است که در آن استراتژی اجماع از نوع LMP دارای سریعترین همگرایی است.



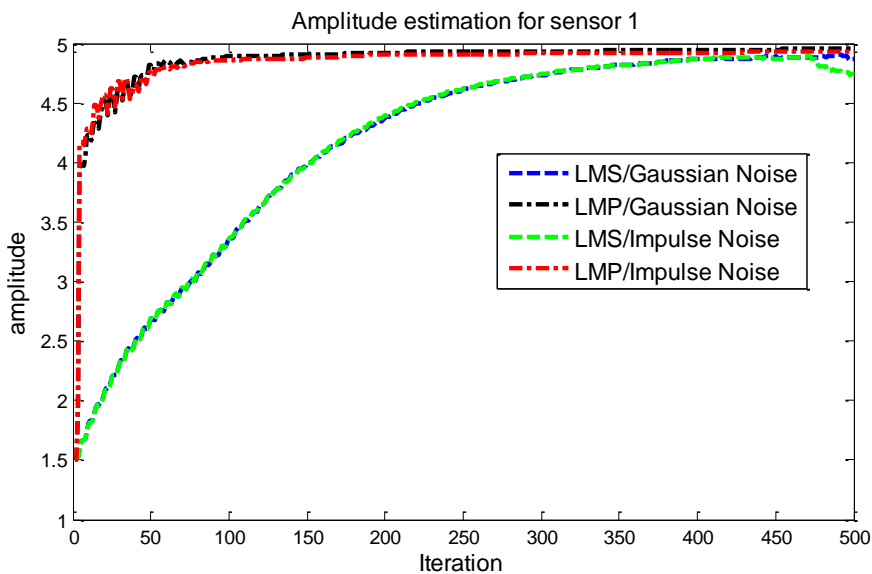
شکل ۱۲- نمودار همگرایی و تخمین فرکانس توزیع شده با نویز ضربه ای

در شکل ۱۳ نمودار خطا بر حسب سیگنال به نویز در روش‌های مورد مقایسه در این آزمایش تحت نویز ضربه‌ای نشان داده شده است. در این حالت، نتایج مشابه حالت نویز گوسی است و باز هم استراتژی پراکندگی از نوع LMP دارای کمترین خطا در تخمین فرکانس است.

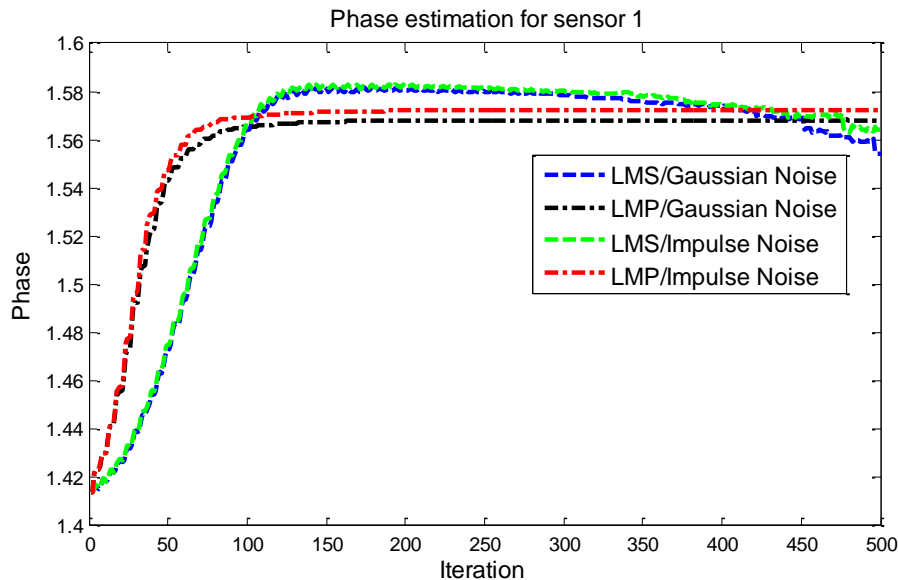


شکل ۱۳- نمودار MSE بر حسب SNR روش‌های توزیع یافته در حالت نویز ضربه‌ای

همانطور که از شکل ۱۳ پیداست، روش‌های LMP توزیع شده نوع ATC، نسبت به سایر روش‌های در SNRهای مختلف، با اختلاف قابل توجهی دارای عملکرد بهتری می‌باشد. این در حالیست که روش LMP توزیع شده نوع اجماع، در $SNR = 30dB$ دارای فاصله اندک با نوع ATC می‌باشد. برآیند کلی از آزمایش‌های بالا نشان دهنده وضعیت مناسب روش پیشنهادی با استراتژی پراکندگی می‌باشد. لذا به صورت محلی در یک حسگر، نمودار همگرایی دامنه و فاز به روش حداقل نورم p خطا با $p = 2$ و $p = 4$ ، به صورت همزمان با تخمین فرکانس توزیع شده، در هر دو نویز گوسی و ضربه‌ای با شرایط یکسان و مشابه با آزمایش‌های انجام شده، در شکل ۱۴ و ۱۵ قابل بررسی می‌باشد.



شکل ۱۴- نمودار همگرایی و تخمین دامنه حسگر اول به صورت محلی



شکل ۱۵- نمودار همگرایی و تخمین فاز حسگر اول به صورت محلی

همانطور که از شکل ۱۴ و ۱۵ مشخص است، با توجه به تخمین محلی انجام گرفته به صورت همزمان با روش تخمین فرکانس توزیع شده، سرعت و دقت همگرایی در روش ارائه شده بهتر و مناسب تر می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش جدید با عنوان حداقل نورم p خطای توزیع شده (dLMP) برای تخمین نه تنها فرکانس بلکه دامنه و فاز، پیشنهاد شده است. شبیه سازی های انجام شده نشان می دهد که الگوریتم پیشنهاد شده در مقایسه با روش های دیگر همچون روش های تک حسگر و توزیع شده مشابه، عملکرد بهتر و مطلوب تر را دارا می باشد. در روش ارائه شده به طور همزمان با تخمین فرکانس توزیع شده، تخمین دامنه و فاز با همگرایی مطلوب و سریع، به صورت محلی ممکن می باشد. با توجه به این مزیت در مقایسه با روش فیلتر ناچ توزیع شده، روش ارائه شده دارای پیچیدگی کمتری و سرعت همگرایی مناسب و بهتری می باشد، چرا که در روش ارائه شده از فیلتر ناچ استفاده نشده است. لذا در حالت کلی و بر اساس تمام آزمایش های انجام شده، نتایج حاصله از استراتژی های توزیع یافته، برتری روش پراکنده را نشان می دهد. با توجه به نتایج حاصل شده، روش حداقل نورم p خطای توزیع شده (dLMP) و پیاده سازی آن با استراتژی پراکنده (ATC)، مستعد تحقیق و توسعه در صنایع مختلف کاربردی از جمله شبکه های قدرت سه فاز می باشد.

۶- مراجع

- Jacobsen, E., Kootsookos, P.(2007), Fast, Accurate Frequency Estimators, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 24, No. 3, pp.123-125.
- معمدی. احمد(۱۳۹۴)، شبکه حسگر بی سیم (WSN)، چاپ اول، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)
- ماهیاری. حمیدرضا، ماهیار. علیرضا، همتیار. افشین (۱۳۹۰)، شبکه های حسگر بی سیم، کاربردها و چالش ها، نشریه گزارش کامپیوتر، شماره ۱۹۸، ۱۶
- Melemary, M., Ibrahim, M., Ramakrishnan, S.(2016), Wireless Sensor Network from Theory to Application, CRC Press Taylor & Francis Group.
- Sohraby, K., Minoli, D., Znati, T.(2007), Wireless sensor networks technology, protocols, and application, published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

6. Candan, C.(2011), A Method for Fine Resolution Frequency Estimation from Three DFT Samples, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 18, No. 6, pp.351-354.
7. Candan, C.(2015), fine resolution frequency estimation from three DFT samples: case of windowed data, Elsevier Signal Processing, vol.144, pp.245-250.
8. X. Liang, A. Liu, X. Pan, Q. Zhang. and F. Chen, A new and accurate estimator with analytical expression for frequency estimation, IEEE communications letters, vol. 20, pp. 105 - 108 , January 2016.
9. Kušljević, M.D., Tomić, J.J., Jovanovic, L.D.(2010), Frequency Estimation of Three-Phase Power System Using Weighted-Least-Square Algorithm and Adaptive FIR Filtering, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 59, No. 2, pp.322-329.
10. Pradhan, A.K., Routray, A., Basak, A.(2005), Power System Frequency Estimation Using Least Mean Square Technique, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.3, pp.1812-1816.
11. Lai, L.L., Tse, C.T., Chan, W.L., SO, A.T.P.(1999), Real-Time Frequency and Harmonic Evaluation Using Artificial Neural Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, No.1, pp.52-59.
12. Ren, J., Kezunovic, M.(2011), Real-Time Power System Frequency and Phasors Estimation Using Recursive Wavelet Transform, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 3, pp.1392-1402.
13. Vladimir, V., Milenko, B., Branko, D.(1994), Voltage Phasor and Local System Frequency Estimation Using Newton Type Algorithm, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.3, pp.1368-1374.
14. Md.Sh. Reza, M. Ciobotaru, V G. Agelidis, (2015), Power system frequency estimation by using a newton-type technique for smart meters, IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, vol.64, Issue: 3, pp. 615 - 624.
15. Dash, P.K., Jena, R.K., Panda, G.(2000), An Extended Complex Kalman Filter for Frequency Measurement of Distorted Signals, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 49, No. 4, pp.746-753.
16. Rodríguez, P., Pou, J., Bergas, J.(2007), Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 2, pp.584-592.
17. Milenko, B., Zeljko, R.(2008), Frequency Measurement of Distorted Signals Using Fourier and Zero Crossing Techniques, Elsevier Electric Power Systems Research, Vol.78, No.8, pp.1407-1415.
18. Sayed, A.(2014), Adaptation, Learning and Optimization Over Network, University of California at Los Angeles, now Publishers Inc, Vol.7, No. 4-5.
19. Kay, S.(1993), Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory, University of Rhode Island.
20. Jacobsen, E., Kootsookos, P.(2007), Fast, Accurate Frequency Estimators, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 24, No. 3, pp.123-125.
21. Farhang-Boroujeny, B.(2013), Adaptive Filter:Theory and Applications, Second Edition, university of utah, USA, John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
22. Xia, Y., Mandic, P.(2012), Widely Linear Adaptive Frequency Estimation of Unbalanced Three-Phase Power Systems, IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, Vol.61, No.1, pp.74-83.
23. Zayyani, H., Dehghan, S.M.(2015), Frequency Estimation of Unbalanced Three-Phase Power System Using a New LMS Algorithm, Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol.11, No.1, pp.71-78.
24. Routray, A., Pradhan A.K., Rao K.P.(2002), A Novel Kalman Filter for Frequency Estimation of Distorted Signal in Power Systems, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.51, No.3, pp.469-479.
25. Li, Ch., Wang, H.(2015), Distributed Frequency Estimation Over Sensor Network, IEEE Sensors Journal, Vol.15, No.7, pp.3973-3983.
26. Kanna, S., Talebi, S.P., Mandic, D.P.(2014), Diffusion widely linear adaptive estimation of system frequency in distributed power grids, Energy Conference (ENERGYCON),IEEE International.
27. Kanna, S., Dini, Dahir H., Xia, Y., Hui, S.Y., Mandic, D.P.(2015), Distributed Widely Linear Kalman Filtering for Frequency Estimation in Power Networks, IEEE Transactions on Signal and Information Processing Over Networks, Vol.1, No.1, pp.45-57.
28. Sayed, A.(2014), Adaptive Networks, Proceedings of the IEEE, Vol.102, No.4, pp.460-497.
29. Dini, D. H., Mandic, D. P.(2012), A Class of Widely Linear Complex Kalman Filters, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Vol.23, No.5, pp. 775-786.