



شناسایی و تخمین فرکانس توزیع شده در شبکه حسگر

علی شادمان فر، کارشناسی ارشد مخابرات سیستم، موسسه آموزش عالی پویش قم

en.alishademan@gmail.com

هادی زبانی، استاد یار، گروه مخابرات، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم

zayyani@qut.ac.ir

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 پارامترهای سیگنال 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 ارائه تخمین فرکانس توزیع شده در شبکه حسگر بی سیم، با سرعت همگرایی و دقت بالا می باشد. علاوه بر تخمین فرکانس توزیع شده، این روش توانایی تخمین دقیق فاز و دامنه را به صورت محلی دارا می باشد. نتایج شبیه سازی، اثربخشی الگوریتم پراکندگی پیشنهادی از نظر پیچیدگی و دقت تخمین را در مقایسه با سایر روش ها نشان می دهد.

کلیدواژه ها:

تخمین سیگنال، تخمین فرکانس توزیع شده، فیلتر وفقی، شبکه حسگر بی سیم، حداقل مربع خطا



1- مقدمه

توسعه فناوری تجهیزات الکترونیکی و به دنبال آن پیشرفت سیستم‌های الکترونیکی، حساسیت بهره‌مندی از شناسایی سیگنال را بالا برده است. کنترل و نظارت از اموری است که مهندسين را جهت تصميم‌گیری و حفاظت از سیستم‌ها وادار می‌نماید. پارامترهای مهمی از سیگنال همچون دامنه، فاز و فرکانس در دسته‌بندی فرآیند شناخت سیگنال قرار دارند. با توجه به اهمیت حفظ ثبات سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی، برای اینکه بتوان تخمین¹ صحیح و دقیق این پارامترها را در شرایط مختلف و محیط‌های پر اختلال انجام داد،

روش‌های بسیاری ارائه شده است (Kootsookos, 1999).

پیشرفت‌های اخیر در فناوری ساخت مدارهای مجتمع در اندازه‌های کوچک از یک سو و توسعه فناوری ارتباطات بی‌سیم از سوی دیگر زمینه‌ساز طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم² شده است. عناصر اصلی در شبکه حسگر بی‌سیم شامل، حسگر یا سنسور³، پردازنده مرکزی⁴ و بخش ارتباطی و مخابراتی (فرستنده - گیرنده) می‌باشد (معمدی، 1394)، (ماهیار، ماهیار، همتیار، 16، 1390).

شبکه‌های حسگر بی‌سیم با توجه به نوع کاربردشان از ده‌ها 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 (معمدی، 1394).

در مجموع، ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم، که در سایه فناوری‌های مربوطه بدست آمده، باعث توسعه سریع کاربردهای آن گردیده است. به طوری که 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 (Ramakrishnan, Ibrahim, Melemary, 2016)، (minoli, Sohraby, 2007, Znati). کاربردهای اساسی این شبکه‌ها مربوط به محیط‌هایی می‌شود که انسان نمی‌تواند در آن حضور داشته باشد (معمدی، 1394).

در این میان شبکه‌های حسگر بی‌سیم، توانایی تجزیه و تحلیل پارامترهای محیطی و سپس ارسال نتایج اطلاعات به پایگاه‌های داده و نهایتاً انجام عکس‌العمل‌های متناسب با شرایط را بر عهده دارند (معمدی، 1394). 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 غیرتوزیع‌شده و روش‌های چند حسگر یا توزیع‌شده⁵ تقسیم بندی نمود.

¹ estimation

² wireless sensor network

³ sensor

⁴ central processor

⁵ distributed



روش ها و الگوریتم⁶ های مختلف تک حسگره، بر مبنای پردازش سیگنال⁷ به وجود آمده اند. از جمله این روش ها می توان به روش هایی همچون، تبدیل فوریه گسسته⁸ (DFT) (351, 2011, Candan)، حداقل مربعات وزندهی شده⁹ (322, 2010, Tomić, Kušljević)، روش حداقل مربع خطا¹⁰ (Pradhan, Routray)، تکنیک های هوش عصبی¹¹ (1812, 2005, Basak)، همچون موجک بازگشتی¹² (1392, 2011, Kezunovic, Ren)، نیوتن¹³ (1368, 1994, Milenko, Vladimir)، فیلتر کالمن¹⁴ (584, 2007, Bergas, Pou)، حلقه قفل فاز¹⁵ (746, 2000, Panda, Jena, Dash)، و تکنیک عبور از صفر¹⁶ (1407, 2008, Zeljko, Milenko) اشاره نمود. این موارد، نمونه هایی از روش های متعدد موجود و در حال توسعه در این حوزه هستند، که کاربردهای بیشتری را دارا می باشند. روش های مختلفی برای تخمین توزیع شده در شبکه حسگر بی سیم ارائه شده است. در حالت کلی سه استراتژی¹⁷ متداول آن روش افزایشی¹⁸، روش اجماع¹⁹ و روش پراکندگی²⁰ می باشد (2014, Sayed). از بین این سه روش، با توجه به مزایای روش پراکندگی، از این روش بیشتر استفاده می شود (2014, Sayed). در این روش، پس از به روز رسانی²¹ تخمین در هر گره، با پراکندگی تخمین ها، تخمین های گره های مجاور با همدیگر ترکیب²² شده و تخمین نهایی به دست می آید.

در ادامه این مقاله، روش حداقل نورم p خطای توزیع شده²³ (dLMP)، جهت تخمین فرکانس توزیع شده در سیگنال سینوسی تک فرکانس ارائه شده است. در بخش دوم این مقاله، اجماًلاً به شناخت و بررسی برخی از روش های موجود تک حسگره 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 مقایسه روش های توزیع یافته و تک حسگره در شرایط خاص نسبت به روش پیشنهادی پرداخته شده و نتیجه گیری حاصله در بخش پنجم آمده است.

⁶ algorithm⁷ signal processing⁸ discrete fourier transform⁹ weighted least square¹⁰ least mean square¹¹ artificial intelligence¹² recursive wavelet transform¹³ newton algorithm¹⁴ kalman filter¹⁵ phase locked loop¹⁶ zero crossing¹⁷ strategy¹⁸ incremental¹⁹ consensus²⁰ diffusion²¹ adapt²² combine²³ distributed least maen p-norm



2- مرور روش های شناسایی و تخمین سیگنال

شناخت دقیق سیگنال و پارامترهای آن کمک بسیاری به عملکرد صحیح و دقیق سیستم می نماید. کاربرد این مبحث در حوزه نظامی جهت تشخیص فرکانس داپلر²⁴ جنگنده یا بالگرد و تجهیزات دشمن از طریق رادار²⁵ 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 شبکه های هوشمند²⁶ و بسیار موارد کاربردی دیگر، گواه اهمیت تخمین و تشخیص به موقع پارامترهای سیگنال و خطای به وجود آمده در سیستم خواهد بود. روش های 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 روش های مهم و مورد استفاده در مقاله بیان شده است.

2-1- روش های تک حسگره (غیر توزیع یافته)

روش های بسیاری برای تخمین پارامترهای سیگنال در شرایط تک حسگره ارائه شده، که براساس کاربرد و اهمیت، برخی از این روش ها در ادامه بیان شده است. روش تخمین حداکثر درست نمایی²⁷ (ML) برای تخمین پارامترهای سیگنال توسط حسگرها، عمدتاً جزء محبوب ترین رویکرد برای ارزیابی تخمین های عملی است. در این بخش، به تخمین دامنه و فاز از طریق این روش اشاره شده است. تخمین های روش بیشینه درست نمایی (ML) در رابطه (1) و (2) آورده شده است (Kay, 1993).

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

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

که در روابط ذکر شده، $X(n)$ سیگنال ورودی و f_0 فرکانسی است که، اندازه تبدیل فوریه گسسته طیف سیگنال در آن ماکزیمم می شود، می باشند (Kay, 1993).

روش دیگری در سال های اخیر، در حوزه تبدیل فوریه گسسته و تبدیل فوریه سریع²⁸ ارائه شده است. در سال 2012 روشی برای تشخیص فرکانس با دقت بالا با استفاده از نمونه برداری DFT²⁹ در سه نقطه ارائه شده

²⁴ doppler frequency

²⁵ radar

²⁶ smart grid

²⁷ maximum likelihood

²⁸ fast fourire transform

²⁹ three DFT sampel



است (351, 2011, Candan). در واقع این روش با انجام دو مرحله زیر، توانایی ردیابی و تخمین فرکانس را دارا می باشد.

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

2- تخمین دقیق تر، بر اساس نتایج جستجوی مرحله اول

هنگامی که نویز مشاهده شده در سیگنال، نویز سفید گوسی³⁰ باشد، در واقع حداکثر درست نمایی تخمین فرکانس آن، از طریق محاسبه تبدیل فوریه گسسته زمان³¹ (DTFT) قله³² سیگنال دریافتی محاسبه می شود. از آنجایی که محاسبه DTFT در طول سیگنال یک عملیات دشوار بوده، نمونه های DTFT با استفاده از تبدیل فوریه گسسته (DFT) محاسبه خواهند شد. با در نظر گرفتن سیگنال ورودی حسگر، فرکانس سیگنال را می توان طبق رابطه (3) محاسبه نمود (351, 2011, Candan).

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

که k_p اندیس قله (وج) DFT و δ فاصله نقطه k_p تا قله طیف سیگنال ورودی می باشد. هدف روش، تخمین δ می باشد تا جایی که δ ، نسبت به فاصله ی 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 (4) محاسبه می شود.

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

در رابطه (4)، $r[n]$ سیگنال مختلط مشاهده شده می باشد. هدف از استفاده نمونه برداری سه نقطه ای DFT حول قله سیگنال ورودی، تخمین δ می باشد. در مرحله دوم از روش DFT سه نقطه ای، تبدیل فوریه گسسته سه نقطه $k_p + 1$ ، k_p و $k_p - 1$ اطراف قله طیف سیگنال ورودی محاسبه خواهد شد. در رابطه (5) صرفاً محاسبه $R[k_p]$ آورده شده است، که قابل تعمیم به نقاط دیگر می باشد (351, 2011, Candan).

$$R[k_p] = A \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\frac{2\pi}{n}\delta n} + \tilde{\omega}[k] = Af(\delta) + \tilde{\omega}[k] \quad (5)$$

³⁰ white gaussian noise

³¹ discrete time fourier transform

³² peak



که در رابطه (5)، $R[k_p]$ تبدیل فوریه گسسته نقطه k_p ، $\tilde{\omega}[k]$ تبدیل فوریه $\omega[k]$ و A دامنه سیگنال می باشد. حال جهت محاسبه نهایی δ از روش جاکوبسن³³ در (123, 2007, Kootsookos, Jacobsen)، که عملکرد بهتری نسبت به سایر روش ها دارد، استفاده شده است. از رابطه (6) برای محاسبه δ به روش جاکوبسن و از رابطه (7) جهت تخمین نهایی فرکانس سیگنال ورودی می توان 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 می توان گفت که این روش، علاوه بر عملیات و محاسبات کمتر دارای دقت بالاتر و مناسب برای محیط های با SNR³⁴ بالاتر است (351, 2011, Candan). پردازش سیگنال یک ابزار امیدوارکننده برای نسل بعدی شبکه های بی سیم و سیستم های الکتریکی می باشد. در همین زمینه، روش حداقل مربعات خطا (LMS) برای اولین بار توسط ویدرو و هوف³⁵ در سال 1960 معرفی، و به طور گسترده ای به دلیل ساختار ساده و توانمندی بالا در محاسبات استفاده می شد (2013, Farhang-Boroujeny). الگوریتم LMS نیز توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است و در طول سال ها، بسیاری از اصلاحات به آن پیشنهاد شده است. از جمله آن ها مقاله (1812, Pradhan, Routray, 2005, Basak) می باشد، که در سال 2005 بر مبنای فیلتر وفقی مدلی مناسب تر برای روش LMS ارائه نموده است (1812, 2005, Basak, Pradhan, Routray).

روش LMS ضرایب فیلتر را در یک حلقه مشخص به روز رسانی می کند، 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 می توان 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 می شود، تا زمانی که مربع سیگنال خطا حداقل شود. این عمل در هر تکرار از طریق رابطه (8) محاسبه می شود (2013, Farhang-Boroujeny).

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

³³ Jacobsen³⁴ signal to noise ratio³⁵ Holf & Widrow



که در آن μ ، اندازه گام است و ω_k ضرایب فیلتر را مشخص می کند. ∇ در رابطه (8) گرادیان سیگنال خطا نسبت به ضریب فیلتر را نشان می دهد (Farhang-Boroujeny, 2013). در سال های اخیر در بهبود این روش، روش هایی همچون 36 CLMS (Basak, Pradhan, Routray, 2005, 1812), 37 ACLMS (Xia, 2012, 74), 38 MLMS (Mandic, Dehghan, Zayyani, 2015, 71) ارائه شده است. روش های ذکر شده، دارای عملکرد مناسب در شبکه قدرت و همچنین حضور در نویز بالا می باشند (Dehghan, Zayyani, 2015, 71). از جمله روش های تخمین فرکانس که در سال های اخیر ارائه شده است می توان به، روش فیلترکالمن اشاره نمود (Panda, Jena, Dash, 2000, 746). این روش به مدل فضای حالت سیگنال وابسته است. در این روش با حذف نویزهای مزاحم و خطای سیستم و همچنین هارمونیک 39 های موجود در سیگنال ورودی، فرکانس سیستم ردیابی و تخمین زده می شود. این روش در سیستم های خطی و غیرخطی کاربرد دارد. فیلترکالمن به دو نوع فیلترکالمن خطی 40 و فیلترکالمن توسعه یافته 41 تقسیم می شود، که نوع توسعه یافته آن بیشتر برای توابع غیرخطی مورد استفاده قرار می گیرد (Panda, Jena, Dash, 2000, 746). این الگوریتم جهت تخمین در نویز بالا به ویژه در سیستم های قدرت توانمند می باشد (Routray, Pradhan, Rao, 2002, 469).

یکی دیگر از روش های تخمین فرکانس، الگوریتم حلقه قفل فاز (PLL) می باشد. حلقه قفل فاز یک روش اساسی با کاربردهای فراوان در مهندسی برق می باشد. ایده اصلی در این روش، تولید یک سیگنال سینوسی است، که فاز آن مولفه اصلی سیگنال ورودی را تقویت می کند. به بیان دقیق تر روش حلقه قفل فاز، مشابه یک سیستم سروو 42 است، که فاز سیگنال خروجی را کنترل می کند، به گونه ای که خطای بین فاز خروجی و فاز ورودی حداقل شود (Bergas, Pou, Rodríguez, 2007, 584).

یکی دیگر از الگوریتم های ارائه شده، جهت تخمین پارامترهای شبکه، تکنیک عبور از صفر می باشد. روش عبور از صفر می تواند برای ردیابی فرکانس در شبکه های قدرت استفاده شود، چرا که وجود هارمونیک های بسیار در سیگنال شبکه های قدرت، نیازمند روشی مناسب جهت شناسایی و تخمین شبکه می باشد. به بیان ساده و کلی، این روش به محاسبه تعداد نقاط عبوری از صفر در یک بازه مشخص از سیگنال ورودی می پردازد. تخمین نهایی در این روش به کمک محاسبه تبدیل فوریه گسسته و تحلیل عناصر کسینوسی و سینوسی سیگنال ورودی، طی روابطی مشخص محاسبه می گردد (Zeljko, Milenko, 2008, 1407).

از جمله روش های دیگری که می توان اشاره نمود، روش هایی همچون موجک بازگشتی، الگوریتم نیوتن، روش های شبکه عصبی، روش حداقل مربعات وزندهی شده و همچنین روش هایی که از ادغام چند الگوریتم حاصل شده اند، می باشند. هر کدام از روش های ارائه شده، متناسب با شرایط محیطی و نوع سیگنال ورودی و عوامل دیگر می بایست انتخاب و به کار گرفته شود.

³⁶ complex LMS³⁷ augmented complex LMS³⁸ modified LMS³⁹ harmonic⁴⁰ linear kalman filter⁴¹ extended kalman filter⁴² servo



2-2- روش های چند حسگره (توزیع یافته)

روش های توزیع یافته باید برای مقابله با شرایط نامطلوب سیگنال و محدودیت های شبکه حسگر بی سیم ارائه شوند، تا بتوانند با دقت تخمین بالاتر، کاربری بهتری پیدا نمایند. سه استراتژی کلی برای تخمین توزیع یافته، به شرح زیر وجود دارد (Sayed, 2014).

(1) 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 می دهد. 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 می شود (Sayed, 2014).

(2) اجماع: در این استراتژی، حسگرهای مجاور به یک اجماع از تخمین دست پیدا می کنند. در واقع در این استراتژی هر حسگر به طور همزمان بر اساس حداقل یک تابع هزینه مشخص و همچنین از ترکیب تخمین های حاصل شده از حسگرهای همسایه، پارامتر مورد نظر را تخمین می نماید. به روز رسانی تخمین پارامترهای سیگنال طبق استراتژی اجماع، طی دو مرحله ی ترکیب و به روز رسانی به صورت همزمان انجام می شود (Sayed, 2014).

(3) 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 (ATC⁴³) انجام می شود. در گونه دیگر از این استراتژی جهت تخمین، ابتدا ترکیب و سپس به روز رسانی (CTA⁴⁴) انجام می شود (Sayed, 2014).

روش فیلتر ناچ توزیع شده (dNF⁴⁵) که از روش حداقل مربع خطا در جهت تخمین فرکانس بهره می گیرد، یک نمونه از روش های توزیع شده می باشد (Wang, Li, 2015, 3973). فیلتر ناچ به سیگنال ورودی در هر حسگر به صورت رابطه (9) اعمال می شود.

$$Y_k[i] = -\rho a Y_k[i-1] - \rho^2 Y_k[i-2] + X_k[i] + a X_k[i-1] + X_k[i-2] \quad (9)$$

که Y_k ، X_k و a و ρ به ترتیب خروجی فیلتر ناچ، سیگنال ورودی، پارامتر نامعلوم که در رابطه (17) تعریف شده است و پارامتر ρ دارای مقداری کمتر و یا برابر یک ($\rho \leq 1$) می باشد. همانطور که اشاره شد، a پارامتر

⁴³ adapt-then-combine

⁴⁴ combine-then-adapt

⁴⁵ distributed notch filtering



نامعلوم در شبکه حسگر می باشد، لذا هر حسگر قادر به ارزیابی پارامتر a در همسایگی خود است. که برای پارامتر a طبق رابطه (10) خواهیم داشت:

$$a = -2 \cos(\omega_0 T) \quad (10)$$

به عبارت دیگر، تخمین فرکانس ω_0 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 (3973, 2015, Wang, Li). تخمین پارامتر به این روش را طی دو مرحله، طبق رابطه های (11) و (12) می توان بیان نمود.

$$\varphi_k(i+1) = a_k(i) - \mu 2Y_k[i](-\rho Y_k[i-1] + X_k[i-1]) \quad (11)$$

$$a_k(i+1) = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \varphi_l(i+1) \quad (12)$$

که در (11)، μ پارامتر اندازه گام به روز رسانی می باشد. در رابطه (12)، c_{lk} بیانگر ضریب ترکیب همسایگی حسگرها و $\varphi_l(i+1)$ نشان دهنده تخمین تولید شده توسط حسگر l ام (l همان حسگر همسایه می باشد) در لحظه $i+1$ ام می باشد. طبق تبدیل فرکانس نسبت به a در رابطه (10)، ابتدا می بایست معکوس این تبدیل را با کمک رابطه (13) 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 (14) استفاده کرد (3973, 2015, Li, Wang).

$$\hat{\omega}_k(i+1) = \frac{1}{T_k} \arccos(-\varphi_k(i+1)/2) \quad (13)$$

$$\omega_k(i+1) = \sum_{l \in N_k} c_{lk} \hat{\omega}_l(i+1) \quad (14)$$

که T_k در رابطه (13) بیانگر دوره تناوب سیگنال در حسگر k ام می باشد.

روش دیگری که در این بخش می توان معرفی نمود، روش فیلتر کالمن توزیع شده (46 D-CKF) در تخمین فرکانس سیستم های قدرت می باشد. هدف از این روش، ارائه مدلی جهت تخمین فرکانس در فضای حالت

⁴⁶ Distributed Complex Kalman Filter



سیگنال، برای شبکه‌های توزیع شده می‌باشد. 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 تخمین‌های سریع و دقیق از فرکانس و سیگنال، برای کنترل و ثبات شبکه نیازمند می‌باشند (45, 2015, Mandic, Hui, Xia, Dini, Kanna).

فیلتر کالمن مختلط تکمیل شده توزیع یافته ($^{47}D-ACKF$) در شرایط خطی و نمونه غیر خطی آن، فیلتر کالمن مختلط تکمیل شده تعمیم یافته به صورت توزیع شده ($^{48}D-ACEKF$)، برگرفته از روش به روز رسانی در (460, 2014, Sayed) و روش فیلتر کالمن در (775, 2012, Mandic, Dini)، به عنوان نمونه‌های

دیگری از روش‌های تخمین فرکانس توزیع شده، در شرایط مختلف و در سیستم‌های خطی و غیر خطی می‌باشند. با توجه به آنکه فرکانس در یک منطقه جغرافیایی دارای توزیع یکسان بوده، در حالی که عدم تعادل ولتاژ و همبستگی متقابل حسگرها می‌تواند متفاوت باشد، این گونه روش‌ها ارائه گردیده است. این روش‌ها برای تخمین فرکانس توزیع شده در سیستم قدرت ارائه گردیده‌اند (45, 2015, Mandic, Hui, Dini, Kanna, Xia).

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

3- روش حداقل نورم p خطای توزیع شده (dLMP)

در روش ارائه شده، یک شبکه از حسگرها، در نظر گرفته شده است. در آن شبکه هر حسگر، سیگنال‌های سینوسی پر اختلالی (با نویز بالا) را به عنوان ورودی حسگر، دریافت می‌کند. هر حسگر در ارتباط دو طرفه بین خود و همسایگان (ارتباطی که حسگرها می‌توانند داده‌ها 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 می‌دهد 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.

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 نورم 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 SNRهای 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 در حالت کلی ارائه شده است.

⁴⁷ Distributed Augmented Complex Kalman Filter

⁴⁸ Distributed Augmented Complex Extended Kalman Filter



3-1- 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 حالیست که هر حسگر دارای تعدادی از حسگرهای مجاور و در همسایگی خود می‌باشد. ارتباط همسایگی می‌تواند به صورت تمام ارتباطی⁴⁹ 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 (15) مشاهده شده است.

$$X_k(i) = A_k \cos(\omega_0 iT + \varphi_k) + v_k(i) \quad (15)$$

که در آن A_k ، φ_k و $v_k(i)$ 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 (16) استفاده نمود.

$$\omega_{i+1} = \omega_i - \mu \nabla (|e|^p) \quad (16)$$

که در رابطه (16)، ω فرکانس و یا هر پارامتر مورد نظر دیگر جهت تخمین، μ پارامتر اندازه گام به روز رسانی و e سیگنال خطا، می‌باشد.

3-2- روش LMP توزیع یافته

با توجه به سیگنال ورودی حسگر k ام، روش ارائه شده برای تخمین پارامترهای سیگنال در هر بار تکرار حلقه، از میانگین توان p ⁵⁰ یا میانگین نورم p سیگنال خطا، استفاده می‌کند (Tseng, Pei, 1994, 1540)، (Wen, 2013, 1355). بنابراین، تابع هزینه محلی به صورت رابطه (17) تعریف می‌شود.

$$J_k^{loc}(\omega) = \sum_{l \in N_k} c_{lk} E\{|e_l(i)|^p\} \quad (17)$$

⁴⁹ fully connected⁵⁰ p-power



که در آن C_{Ik} ، ضرایب غیر منفی ارتباط همسایگی را نشان می دهد. 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 (18) نشان داد.

$$e_l(i) = d_l(i) - \hat{A}_{l,i} \cos(\hat{\omega}_{l,i} iT + \hat{\phi}_{l,i}) \quad (18)$$

در رابطه (18)، $d_l(i)$ سیگنال مطلوب و $\hat{A}_{l,i}$ ، $\hat{\omega}_{l,i}$ ، $\hat{\phi}_{l,i}$ به ترتیب دامنه، فرکانس و فاز تخمین زده شده، حسگر l ام در لحظه i ام می باشند. لازم به یاد آوری می باشد که، دامنه و فاز در صورت نیاز به شیوه محلی توسط هر حسگر جداگانه محاسبه می شود. حال به کمک روابط (19) تا (21)، به عنوان روابط به روز رسانی تخمین در حلقه تکرار مشخص l ، می توان هر سه پارامتر فرکانس، دامنه و فاز را شناسایی کرد.

$$\hat{A}_{k,i+1} = \hat{A}_{k,i} - \mu_A \nabla_{\hat{A}_{k,i}} (J_k^{loc}(\omega)) \quad (19)$$

$$\hat{\phi}_{k,i+1} = \hat{\phi}_{k,i} - \mu_\phi \nabla_{\hat{\phi}_{k,i}} (J_k^{loc}(\omega)) \quad (20)$$

$$\hat{\omega}_{k,i+1} = \hat{\omega}_{k,i} - \mu_\omega \nabla_{\hat{\omega}_{k,i}} (J_k^{loc}(\omega)) \quad (21)$$

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 می باشند، که بر اساس همگرا شدن و رابطه (22) زیر تعیین می شود.

$$0 < \mu < \frac{2}{P_{in}} \quad (22)$$

که در آن، P_{in} به میانگین توان ورودی اشاره می کند. بر این اساس μ کوچکتر، بیانگر طولانی بودن زمان دریافت ورودی ها با حداقل خطای آن می باشد. گردایان تابع هزینه رابطه (17)، بر حسب دامنه، فاز و فرکانس سیگنال، طبق روابط (23) تا (25) محاسبه می شود.

$$\nabla_{\hat{A}_{l,i}} (|e_l(i)|^p) = p \cdot \text{sign}(e_l(i)) \cdot |e_l(i)|^{p-1} \cdot \nabla_{\hat{A}_{l,i}} e_l(i) \quad (23)$$

$$\nabla_{\hat{\phi}_{l,i}} (|e_l(i)|^p) = p \cdot \text{sign}(e_l(i)) \cdot |e_l(i)|^{p-1} \cdot \nabla_{\hat{\phi}_{l,i}} e_l(i) \quad (24)$$



$$\nabla_{\hat{\omega}_{l,i}} (|e_l(i)|^p) = p \cdot \text{sign}(\mathbf{e}_l(i)) \cdot |e_l(i)|^{p-1} \cdot \nabla_{\hat{\omega}_{l,i}} e_l(i) \quad (25)$$

در روابط (23) تا (25) می توان مشتق سیگنال خطا را بر حسب هر پارامتر، از رابطه (26) تا (28) استخراج نمود.

$$\nabla_{\hat{A}_{l,i}} (\mathbf{e}_l(i)) = -\cos(\hat{\omega}_{l,i}iT + \hat{\varphi}_{l,i}) \quad (26)$$

$$\nabla_{\hat{\varphi}_{l,i}} (\mathbf{e}_l(i)) = \hat{A}_{l,i} \sin(\hat{\omega}_{l,i}iT + \hat{\varphi}_{l,i}) \quad (27)$$

$$\nabla_{\hat{\omega}_{l,i}} (\mathbf{e}_l(i)) = \hat{A}_{l,i} iT \sin(\hat{\omega}_{l,i}iT + \hat{\varphi}_{l,i}) \quad (28)$$

تا این مرحله هر حسگر، با روش به روز رسانی تخمین به عنوان گام اول توانسته است، به تخمینی نسبتاً دقیق، حول مقدار واقعی هر سه پارامتر سیگنال ورودی دست یابد. حال روابط (19) تا (20) را می توان به صورت روابط (29) تا (31) بسط داد.

$$\hat{A}_{k,i+1} = \hat{A}_{k,i} + \mu_A \cdot p \cdot \text{sgn}(\mathbf{e}_l(i)) \cdot |e_l(i)|^{p-1} \cdot \cos(\hat{\omega}_{l,i}iT + \hat{\varphi}_{l,i}) \quad (29)$$

$$\hat{\varphi}_{k,i+1} = \hat{\varphi}_{k,i} - \mu_\varphi \cdot p \cdot \text{sgn}(\mathbf{e}_l(i)) \cdot |e_l(i)|^{p-1} \cdot \hat{A}_{l,i} \sin(\hat{\omega}_{l,i}iT + \hat{\varphi}_{l,i}) \quad (30)$$

$$\hat{\omega}_{k,i+1} = \hat{\omega}_{k,i} - \mu_\omega \cdot p \cdot \text{sgn}(\mathbf{e}_l(i)) \cdot |e_l(i)|^{p-1} \cdot \hat{A}_{l,i} iT \sin(\hat{\omega}_{l,i}iT + \hat{\varphi}_{l,i}) \quad (31)$$

که در روابط (29) تا (31)، $\hat{A}_{k,i+1}$ ، $\hat{\varphi}_{k,i+1}$ ، $\hat{\omega}_{k,i+1}$ به ترتیب تخمین حاصل شده از دامنه، فاز و فرکانس در لحظه $1 + \text{Am}$ در حسگر k ام، بر اساس به روز رسانی می باشد. همان طور که در اول بخش گفته شد، گام دوم در استراتژی ATC، مرحله ترکیب یا اشتراک گذاری اطلاعات با همسایگان می باشد. در این مرحله با اشتراک گذاری تخمین فرکانس حاصله هر حسگر در گام اول به عنوان عامل مشترک در شبکه، با حسگرهای مرتبط و همسایه، منجر به تولید تخمین نهایی و دقیق تر فرکانس در شبکه توزیع یافته (چند حسگره) خواهد شد. برای این مرحله از رابطه (32) کمک گرفته می شود.

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

در رابطه (32)، $\hat{\omega}_{l,i}$ فرکانس تخمین شده حسگر l ام (حسگر همسایه) در لحظه Am در مرحله اول (به روز رسانی) می باشد. روش پیشنهادی این مزیت را دارا بوده که، علاوه بر تخمین فرکانس توزیع شده، دامنه و فاز



هر حسگر به صورت محلی و جداگانه و همزمان با تخمین فرکانس توزیع شده، تخمین و به روز رسانی نماید. محاسبه محلی دامنه و فاز طبق روابط (29) و (30) در بالا بوده و نتایج همگرایی آن در بخش چهارم قابل مشاهده و بررسی می باشد.

به طور کلی استراتژی ATC برای روش ارائه شده، برای هر حسگر، در دو مرحله می توان ارائه نمود. مرحله اول، تخمین اولیه و به روز رسانی فرکانس می باشد. در این مرحله تخمین فرکانس، از طریق رابطه (31) حاصل می شود.

مرحله دوم، بهره گیری از رابطه ترکیب (اشتراک گذاری) با تخمین حاصل شده از حسگرهای همسایه خواهد بود. این مرحله جهت رسیدن به همگرایی بیشتر و دقیق تر فرکانس به عنوان عامل مشترک در شبکه حسگر بی سیم می باشد، که از رابطه (32) استفاده می شود.

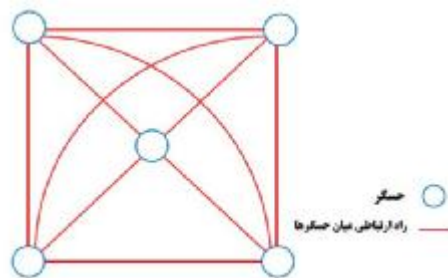
با توجه به روش ارائه شده در بخش نتایج شبیه سازی، شاهد نتایج مقایسه آن با سایر روش های تک حسگره و چند حسگره مشابه خواهیم بود.

4- 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، $p = 2$ و $p = 4$ 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. در روش پیشنهادی قابلیت تخمین فاز و دامنه به صورت 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 500Hz انجام شده است. هر آزمایش از شبیه سازی، 100 بار تکرار شده است. سیگنال مطلوب به عنوان سیگنال ورودی به شبکه با فاز، دامنه و فرکانس به ترتیب $\frac{\pi}{2}$ ، 5 و 50 Hz در نظر گرفته شده است. شبکه حسگر طراحی شده در این شبیه سازی با 5 حسگر مدل شده است، که تمامی این حسگرها با ساختاری توزیع شده، به طور یکسان با هم در ارتباط می باشند. شکل 1 مدل شبکه را نشان می دهد.



شکل ۱: مدل شبکه حسگر توزیع شده

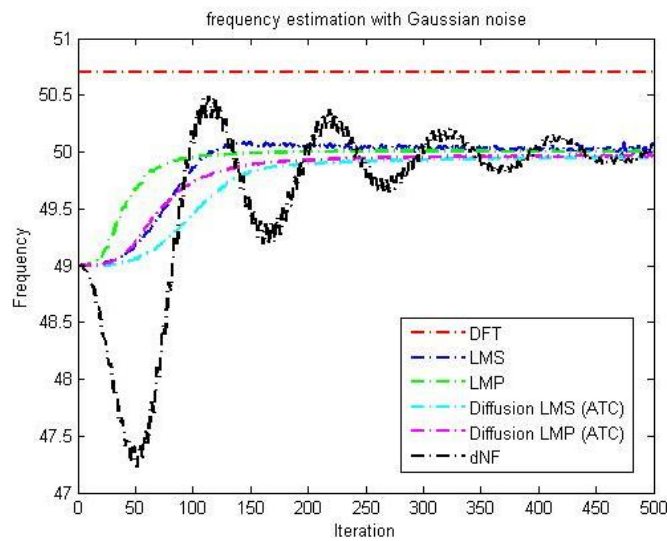
در کلیه آزمایش‌های انجام شده، برای محاسبه ماتریس عملکرد، خطای مربع میانگین (MSE^1) فرکانس استفاده شده است، که به صورت رابطه (33) تعریف می‌شود.

$$MSE = \frac{1}{K} \sum_{K=1}^K \frac{1}{K} (f_0 - \hat{f}_0)^2 \quad (33)$$

که در رابطه (33)، $K=100$ ، f_0 به عنوان مقدار اولیه فرکانس و همچنین \hat{f}_0 ، بیانگر مقدار تخمین زده شده فرکانس می‌باشند.

آزمایش 1) 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 500Hz و 700 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 2 نمودار همگرایی روش‌ها مورد مقایسه، آورده شده است.

⁵¹ mean square error

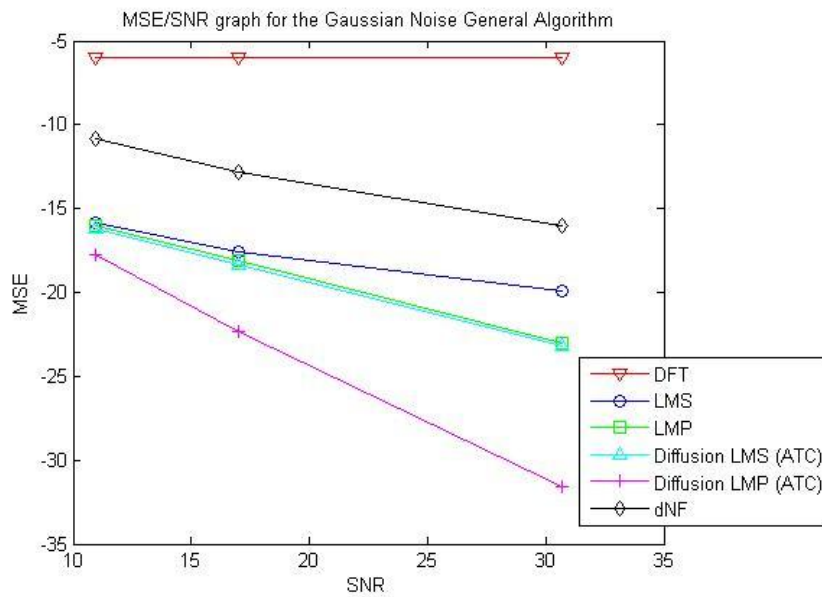


شکل 2: نمودار همگرایی و تخمین فرکانس با نویز گوسی

در شکل 3 نمودار MSE بر حسب سیگنال به نویز در هر روش نشان داده شده است. برای محاسبه سیگنال به نویز (SNR) های متفاوت، از دامنه های مختلف استفاده شده است، که به صورت رابطه (34) محاسبه شده است.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{A^2}{2\sigma^2} \right) \quad (34)$$

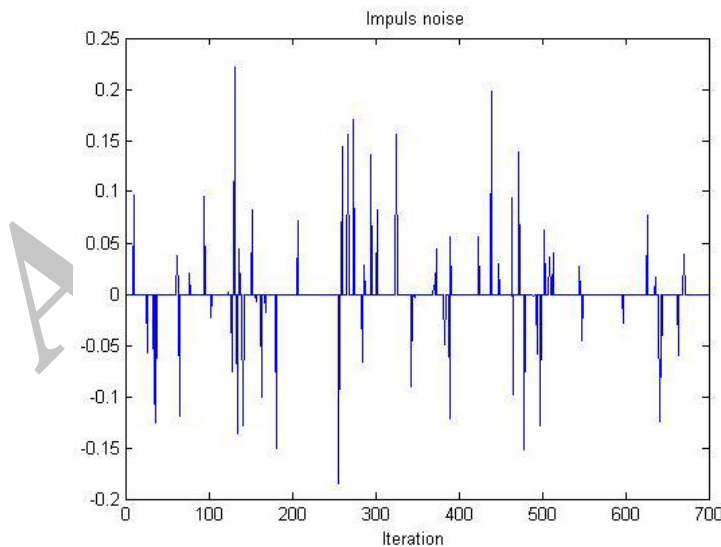
که A بیانگر دامنه سیگنال و σ^2 واریانس نویز ($\sigma^2 = 0.1$) می باشد. SNR شبیه سازی شده از $10dB$ تا $30dB$ در نظر گرفته شده است. همانطور که از شکل 3 پیداست، در سیگنال به نویزهای بالا، روش پیشنهادی توزیع شده LMP با $p = 4$ از همه بهتر است.



شکل 3: نمودار MSE بر حسب SNR در حالت نویز گوسی

آزمایش 2) در آزمایش دوم، نویز ضربه‌ای⁵² به صورت برنولی⁵³ -گوسی با 10 درصد نمونه‌های ضربه‌ای در نظر

گرفته شده است. نویز ضربه‌ای طبق شکل 4 نشان داده شده است.

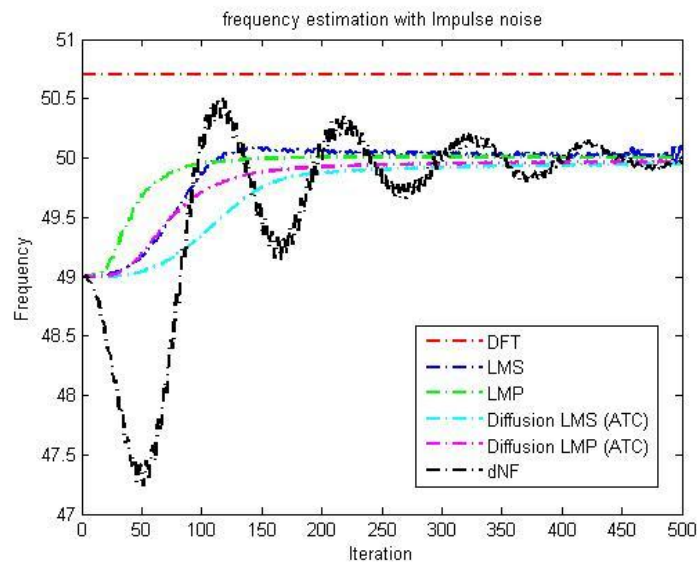


شکل 4: نمودار نویز ضربه‌ای در شبکه حسگر بی سیم

⁵² impulse⁵³ bernolli

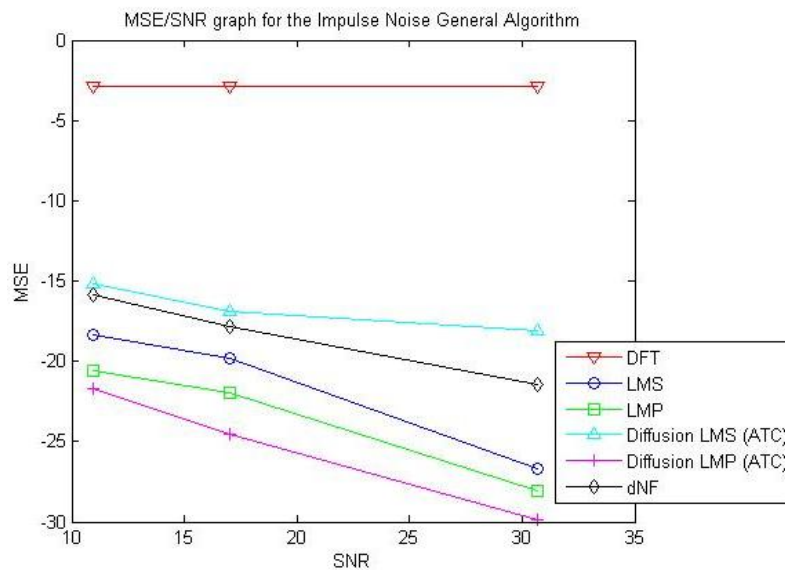


همچون آزمایش قبل، آزمایش دوم در فرکانس نمونه برداری 500 Hz و با 700 تکرار در نظر گرفته شده است. μ برای هر روش به گونه‌ای در نظر گرفته شده، تا در 700 تکرار، به همگرایی برسد. در شکل 5 نمودار همگرایی فرکانس توزیع یافته روش ارائه شده با روش‌های تک حسگر و توزیع شده مشابه همچون آزمایش اول قابل مشاهده و بررسی می‌باشد.



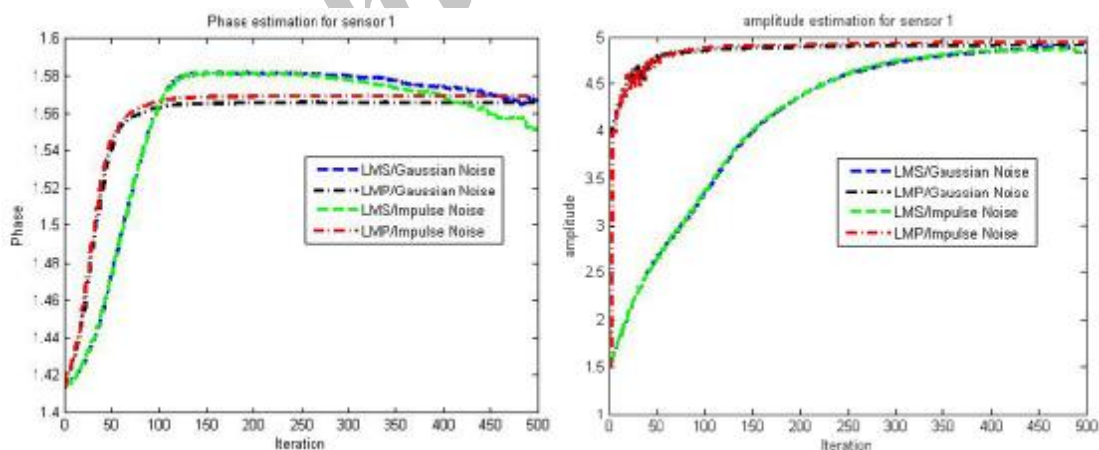
شکل 5: نمودار همگرایی و تخمین فرکانس با نویز ضربه‌ای

در شکل 6، نمودار خطا 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 نویز های بررسی شده، دارای شرایط بهتری نسبت به سایر روش‌ها بوده و همچنین در حالت کلی، روش LMP توزیع شده دارای عملکرد بهتری می‌باشد.



شکل 6: نمودار MSE برحسب SNR در حالت نویز ضربه‌ای

برآیند کلی از آزمایش های بالا نشان دهنده وضعیت مناسب روش پیشنهادی با استراتژی پراکندگی می باشد. لذا به صورت محلی در یک حسگر، نمودار همگرایی دامنه و فاز به روش حداقل نورم $p = 2$ 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 7 قابل بررسی می باشد. سرعت و دقت همگرایی در روش ارائه شده با توجه به شکل دارای شرایط مناسب تر با سرعت تخمین بالا می باشد.



شکل 7: نمودار همگرایی دامنه و فاز حسگر اول به صورت محلی



5- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش جدید با عنوان حداقل نورم p خطای توزیع شده (dLMP) 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 حسگره و توزیع شده مشابه، عملکرد بهتر، همگرایی دقیق، سرعت بالا و پیچیدگی کم 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 کمتر 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 آزمایش های انجام شده، روش حداقل نورم p خطای توزیع شده (dLMP) و پیاده سازی آن با استراتژی پراکنندگی (ATC)، مستعد تحقیق و توسعه در صنایع مختلف کاربردی از جمله شبکه های قدرت سه فاز می باشد.

مراجع

[1] ماهیار، حمیدرضا، ماهیار، علیرضا، همتیار، افشین (1390)، شبکه های حسگر بی سیم، کاربردها و چالش ها، نشریه گزارش کامپیوتر، شماره 198، 16

[2] معتمدی، احمد (1394)، « شبکه حسگر بی سیم (WSN) »، چاپ اول، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Farhang-Boroujeny, B.(2013), *Adaptive Filter:Theory and Applications*, Second Edition, university of utah, USA, John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
- [7] Jacobsen, E., Kootsookos, P.(2007), *Fast, Accurate Frequency Estimators*, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 24, No. 3, pp.123-125.
- [8] 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.
- [9] Kay, S.(1993), *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, University of Rhode Island.
- [10] Kootsookos, P. J.(1999), *A Review of the Frequency Estimation and Tracking Problems*, CRC for Robust and Adaptive Systems ,DSTO, Salisbury Site ,Frequency Estimation and Tracking Project.



- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Li, Ch., Wang, H.(2015), *Distributed Frequency Estimation Over Sensor Network*, IEEE Sensors Journal, Vol.15, No.7, pp.3973-3983.
- [14] Melemary, M., Ibrahim, M., Ramakrishnan, S.(2016), *Wireless Sensor Network from Theory to Application*, CRC Press Taylor & Francis Group.
- [15] 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.
- [16] Pei, s-ch., Tseng, ch-ch.(1994), *Least mean p-power error criterion for adaptive FIR filter*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.12, No.9, pp.1540-1547.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Sayed, A.(2014), *Adaptation, Learning and Optimization Over Network*, Vol.7, No. 4-5, University of California at Los Angeles, now Publishers Inc.
- [22] Sayed, A.(2014), *Adaptive Networks*, Proceedings of the IEEE, Vol.102, No.4, pp.460-497.
- [23] Sohrawy, K., Minoli, D., Znati, T.(2007), *Wireless sensor networks technology, protocols, and application*, published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [24] 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.
- [25] Wen, F.(2013), *Diffusion least-mean P-power algorithms for distributed estimation in alpha-stable noise environments*, IET (Institution of Engineering and Technology), Electronics Letters, Vol.49, No.21, pp.1355-1356.
- [26] 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.
- [27] 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.