تخمین کور همزمان فرکانس حامل، نرخ سمبل و مرتبه مدولاسیون در MFSK با استفاده از کمولنت چرخشی مرتبه دوم

حسین خالقی بیزکی[۱]، لیلا سادات حسینی[۲]
[۱] دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، bizaki@yahoo.com
[۲] دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، ls.hoseini@yahoo.com

چکیده: تخمین کور پارامترهای سیگنال مانند فرکانس حامل، نرخ سمبل و تشخیص نوع مدولاسیون، یکی از مسائل مهم در مخابرات غیرهمکارانه به‌منظور کدبرداری و دمدولاسیون سیگنال می‌باشد. در بسیاری از مقالات با فرض معلوم بودن پارامترهای نرخ سمبل و فرکانس حامل، به تشخیص مدولاسیون پرداخته شده و یا تنها روی تخمین نرخ سمبل و فرکانس حامل سیگنال متمرکز شده‌اند. کمولنت چرخشی سیگنال، رفتار سیگنال را در حوزه فرکانس نشان داده و ویژگی‌های وابسته به چرخشی بودن سیگنال را استخراج می‌کند. در این مقاله از ویژگی کمولنت چرخشی مرتبه دوم سیگنال‌های مدوله‌شده با مدولاسیون MFSK، به‌منظور تخمین سه پارامتر سیگنال (فرکانس حامل، نرخ سمبل و نوع مدولاسیون) به‌طور همزمان استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها: *تخمین نرخ سمبل، تخمین فرکانس حامل، تشخیص مدولاسیون، کمولنت چرخشی مرتبه دوم، مدولاسیون MFSK*

۱- مقدمه

شناسایی خودکار مدولاسیون، مرحله‌ای بین آشکارسازی سیگنال و دمدولاسیون آن است. در این مرحله، نوع مدولاسیون سیگنال دریافتی با توجه به مدولاسیون‌های پیش‌فرضِ موجود، تشخیص داده می‌شود. شناسایی نوع مدولاسیون کاربردهای فراوانی در زمینه‌های تجاری و غیرتجاری دارد. در بررسی عملکرد یک سیستم طبقه‌بند مدولاسیون، پارامترهای زیادی همچون احتمال تشخیص صحیح، شرایط و نوع کانال، مجموعه مدولاسیون‌های موجود در محیط و پارامترهای سیگنال مانند نرخ سمبل‌ها و فرکانس حامل، مشخصات فیلتر شکل‌دهنده[۱] سمبل‌ها در فرستنده و گیرنده دخیل‌اند. یک طبقه‌بند مدولاسیون، شامل مرحله پیش‌پردازش و الگوریتم طبقه‌بندی است. وظایف پیش‌پردازش شامل کاهش نویز، یکسان‌سازی و تخمین پارامترهایی مانند تخمین فرکانس حامل، نرخ سمبل و توان سیگنال می‌باشد[1]. از روش‌های تخمین فرکانس حامل می‌توان به تبدیل فوریه معکوس و ویولت[۲] اشاره کرد[2] همچنین [2]همچنین به‌منظور تخمین نرخ سمبل می‌توان روش احتمال، روش خودهمبستگی دوری، روش فیلتربانک و تبدیل فوریه معکوس و تبدیل ویولت را نام برد[2]. روش‌های تشخیص مدولاسیون به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند: نخستین مورد که بنام روش تئوری تصمیم‌گیری[۳] است اغلب از معیارهای آماری همچون تخمین گر بیز [3] و تخمینگر بیشترین شباهت [3] برای طبقه‌بندی مدولاسیون بهره می‌برند. در روش دوم با نگاشتِ سیگنال به فضای ویژگی و با بهره‌گیری از مزایای الگوریتم‌های تشخیص الگو[۴] همچون شبکه‌ی عصبی [4]، عملیات تشخیص مدولاسیون انجام می‌شود.

در این مقاله هدف این است که بدون آگاهی از مؤلفه‌های سیگنال در فرستنده، با استفاده از ویژگی کمولنت چرخشی مرتبه دوم استخراج‌شده از سیگنال دریافتی، سه پارامتر مذکور (فرکانس حامل، نرخ سمبل و نوع مدولاسیون) به‌طور همزمان از سیگنال

[۱] Shaping filter
[۲] wavelet
[۳] Decision Theoretic
[۴] Pattern Recognition

استخراج شوند. تا سیگنال را برای آنالیز و پردازش و در نهایت دمدولاسیون آماده کنند. استخراج ویژگی مناسب، یکی از مهم‌ترین بخش‌های روش‌های تشخیص مدولاسیون مبتنی بر خواص آماری سیگنال است. بهترین ویژگی باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد، که در برابر اثرات نویز، بیشترین مقاومت را از خود نشان دهد [۴]. اغلب مقاله‌های منتشرشده در سال‌های اخیر به‌صورت مجزا به مباحث تشخیص مدولاسیون و تخمین نرخ سمبل و فرکانس حامل هر یک با روش‌های متفاوت پرداخته‌اند. در این مقاله روش کمولنت چرخشی مرتبه دوم، به‌عنوان روش مناسب در کانال گوسی انتخاب شده است، که قادر است به‌طور هم‌زمان سه پارامتر اصلی را از سیگنال استخراج کند. در مقاله حاضر، علاوه بر تخمین پارامترهای نرخ سمبل و فرکانس حامل، به تشخیص مدولاسیون سیگنال‌هایMFSK در کانال AWGN، پرداخته شده است.

ادامه مقاله بدین‌صورت است که در بخش دوم ویژگی کمولنت چرخشی[۵] مرتبه دوم و بخش سوم و چهارم نیز شامل روش پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی بوده و بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری اختصاص‌یافته است.

۲- ویژگی کمولنت چرخشی مرتبه دوم

ممان‌ها و کمولنت‌ها ویژگی‌های آماری هستند که برای شناسایی مشخصه‌های داده به کار می‌روند. این ویژگی‌های آماری در زمینه پردازش سیگنال و تشخیص مدولاسیون یک سیگنال نویزی استفاده می‌شوند. دلیل اصلی کاربرد ممان‌ها و کمولنت‌ها کم کردن اثر نویز می‌باشد[2].

کمولنت مرتبه دوم یک سیگنال مخابراتی به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$C_{20} = cum(x,x) = M_{20}$$
$$M_{pq} = E\left[x(t)^{p-q} X^{*}(t)^{q}\right]$$

در رابطه (۲) پارامتر E ،عملگر امید ریاضی می‌باشد. در M_{pq}، زیرنویس P بیانگر مرتبه اصلی ممان[۶]، و زیرنویس q بیانگر مرتبه مختلط[۷]ممان می‌باشد. کمولنت مرتبه دوم سیگنال متناوب $x(t)=\sum_n a_n g(t-nT)$ با شکل موج $g(t)$ و دوره تناوب T از رابطه زیر به دست می‌آید[6]:

$$\begin{aligned} Cum(x,x) &= E[x(t)x(t)] \\ &= \sum_n \sum_m E[a_n a_m] g(t-nT) g(t-mT) \\ &= \sigma_a^2 \sum_n g^2(t-nT) \end{aligned}$$

در رابطه (۳)، $\sigma_a^{\,2}$ توان سیگنال می‌باشد. ازآنجاکه سیگنال‌های مخابراتی شامل سمبل‌های متناوب با دوره T می‌باشند، کمولنت آن‌هم با دوره T متناوب است. لذا می‌توان با اعمال تبدیل فوریه به یک سیگنال متناوب، رفتار متناوب (چرخشی) آن را در حوزه فرکانس مشاهده کرد[6].

کمولنت چرخشی مرتبه دوم سیگنال $x(t)$ با اعمال تبدیل فوریه از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$cyclic\ cum(x,x) = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} cum(x,x) e^{-j2\pi\alpha t}\, dt$$
$$= \sigma_a^{\,2} e^{-j2\pi\alpha t} \sum_n \frac{1}{T}\int_{-T/2-nT}^{T/2-nT} g(t)^2 e^{-j2\pi\alpha(t+nT)}\, d(t)$$
$$= \sigma_a^{\,2} \frac{1}{T}\int_{-\infty}^{\infty} g^2(t) e^{-j2\pi\alpha t}\, d(t)$$

بنابراین رابطه (۴) بیانگر مقدار کمولنت چرخشی مرتبه دوم سیگنال $x(t)$ است که در آن $\alpha = \frac{k}{T_0}\ K \in Z$ فرکانس چرخشی[۸] و T_0 دوره تناوب سیگنال $x(t)$ می‌باشد.ذکر این نکته لازم است که مقادیر کمولنت مرتبه سوم و بالاتر نویز گوسی صفر می‌باشد[۵]. این ویژگی سبب می‌شود تا در کانال‌های با نویز گوسی، اثرات نویز تقریباً از بین برود. همچنین در [6] اثبات می‌شود که نویز یک فرآیند دوری با میانگین صفر است، لذا فرکانس‌های چرخشی غیرصفر را شامل نمی‌شود، بنابراین برای فرکانس $\alpha \neq 0$، $S(t)$ و $x(t)$ دارای کمولنت چرخشی مرتبه دوم تقریباً یکسان هستند. در نتیجه برای مجموع دو سیگنال، مقدار کمولنت مرتبه دوم به‌صورت زیر تعریف می‌شود [7,8]:

$$S(t) = x(t) + n(t)$$
$$\mathrm{cum(s,s)} = \mathrm{cum(x,x)} + \mathrm{cum(n,n)}$$
$$\mathrm{cum(n,n)} \approx 0$$
$$cum(s,s) \approx cum(x,x)$$

در این مقاله، سیگنال MFSK را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

---

[۵] Cyclic cumulants
[۶] Moment
[۷] conjugate
[۸] Cyclic frequency

$$x_{fsk}(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} g(t-nT_0)\cos(2\pi[f_c+f(n)]t)+n(t)$$ که

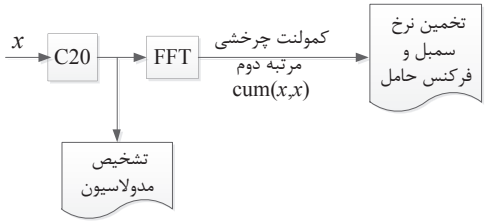
$$f(n)=\sum_{m=1}^{M} f_m\delta(nm)$$

$g(t)$ فیلتر شکل‌دهنده پالس و T_0 تناوب سمبل‌ها، f_c فرکانس حامل و $f(n)$ فرکانس‌های Mتایی با احتمال p_m و $\delta(n)$ بردار ضربه واحد در سیگنال MFSK می‌باشد. $n(t)$ نویز گوسی با میانگین صفر در نظر گرفته شده است.

۳- روش‌های پیشنهادی

۳-۱ روش پیشنهادی اول

در شکل (۱) ویژگی‌های استخراجی سیگنال به‌منظور تخمین پارامترهای سیگنال و تشخیص مدولاسیون، نشان داده‌شده است. ویژگی کمولنت چرخشی مرتبه دوم، این قابلیت را ایجاد می‌کند، تا سه پارامتر سیگنال به‌طور هم‌زمان استخراج شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پس از دریافت سیگنال در گیرنده، مقدار کمولنت مرتبه دوم آن محاسبه می‌شود.



شکل ۱: بلوک دیاگرام ویژگی‌های استخراجی از سیگنال به‌منظور تخمین پارامترها (روش پیشنهادی اول)

مقادیر خروجی کمولنت‌ها در شرایط بدون نویز گوسی، مطابق با جدول (۱) خواهد بود. به دلیل تفاوت در این مقادیر، این ویژگی می‌تواند به‌عنوان یک ویژگی مناسب جهت تفکیک دو مدولاسیون2FSK و 4FSK باشد. برای تخمین پارامترهای نرخ سمبل و فرکانس حامل، با تبدیل فوریه گرفتن از کمولنت سیگنال دریافتی، مطابق با رابطه (۴)، عمل می‌کنیم. ازآنجاکه این ویژگی نمایش‌دهنده توان سیگنال در حوزه فرکانس است[6]، توان سیگنال در فرکانس نرخ سمبل و فرکانس حامل، با ظهور پیک-هایی با مقادیر بزرگ‌تر از دیگر دامنه‌ها در سایر فرکانس‌ها می‌باشد. بدین ترتیب با محاسبه کمولنت چرخشی مرتبه‌دوم سیگنال به تخمین سه پارامتر نوع مدولاسیون، فرکانس حامل و نرخ سمبل سیگنال‌های 2FSK,4FSK می‌رسیم.

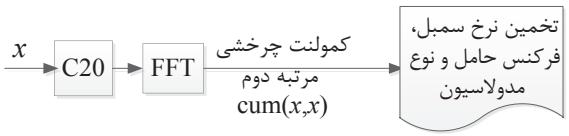
معیار تصمیم‌گیری تشخیص صحیح مدولاسیون‌ها، در این مقاله مطابق رابطه‌ی $M=argmin_M\ ||F_r-F_x||$ تعریف می‌شود که در آن F_x به‌عنوان ویژگی جداکننده سیگنال ارسالی است، که در فرستنده محاسبه می‌شود. F_r ویژگی استخراج‌شده از سیگنال دریافتی بوده که در گیرنده محاسبه و مقداری متغیر داشته که متأثر از نویز و محوشدگی کانال است. F_x و F_r مقدار متوسط کمولنت چرخشی مرتبه دوم در بازه‌ای از فرکانس دوری برای هر یک از سیگنال‌های 2FSK و 4FSK مدوله شده محاسبه شده است.

جدول ۱. مقادیر کمولنت مرتبه دوم برای سیگنال‌های 2FSK و 4FSK

	C20
2FSK	0.1
4FSK	0.6

۳-۲ روش پیشنهادی دوم

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، در روش پیشنهادی دوم از ویژگی کمولنت چرخشی مرتبه دوم، هر سه ویژگی نرخ سمبل، فرکانس حامل و نوع مدولاسیون سیگنال استخراج می‌شود.



شکل ۲: بلوک دیاگرام ویژگی‌های استخراجی از سیگنال به‌منظور تخمین پارامترها (روش پیشنهادی دوم)

برای تشخیص فرکانس حامل و نرخ سمبل در روش‌های پیشنهادی اول و دوم از رابطه زیر استفاده می‌شود:

(۷)

$$2\hat{f}_c=\arg\max\{cyclic\ cum(x_{fsk},x_{fsk})\}\big|_{\alpha\neq 0}$$

$$\hat{R}_{symbol}=\arg\max\{cyclic\ cum(x_{fsk},x_{fsk})\}\big|_{\alpha\neq 0,2\hat{f}_c}$$

با استناد به رابطه (۷) با جستجوی پیک‌های مقادیرِ کمولنت چرخشی سیگنال، می‌توان اولین پیک که مربوط به نرخ سمبل و بلندترین پیک که مربوط به فرکانس حامل است را، جدا نمود و فرکانس متناظر با هر یک را به ترتیب به‌عنوان نرخ سمبل و فرکانس حامل تخمین زد.

کانال گوسی تأثیراتی بر سیگنال از جمله تضعیف دامنه خواهد داشت، اما ازآنجاکه مقدار کمولنت چرخشی مرتبه دوم سیگنال

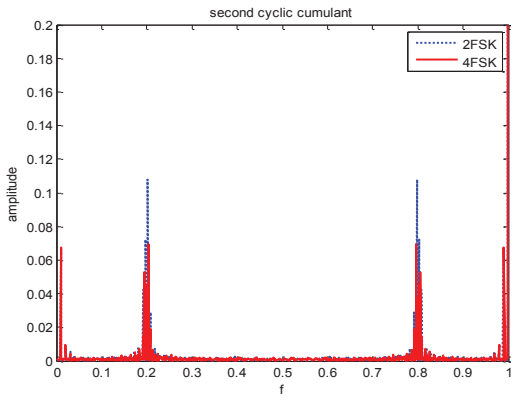
تقریباً صفر است، لذا در یک محیط گوسی همچنان پیک‌های مربوط به فرکانس حامل و نرخ سمبل قابل‌تشخیص است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، اولین پیک (در کمولنت چرخشی مرتبه دوم) مربوط به نرخ سمبل است و فرکانس متناظر آن نرخ سمبل نرمالیزه شده می‌باشد. همچنین دومین پیک (در کمولنت چرخشی مرتبه دوم) مربوط به فرکانس حامل است و فرکانس متناظر آن برابر با $2f_c$ نرمالیزه شده می‌باشد.

همچنین برای تشخیص مدولاسیون MFSK، با توجه به استفاده از شکل پالس متناوب با دوره T_0، کمولنت چرخشی مرتبه دوم در فرکانس چرخشی $\alpha=\frac{k}{T_0}\ K\in Z$ دارای مقادیر غیر صفر است، که در آن K مقادیر صحیح می‌باشد. همچنین، نشان داده می‌شود که مقدار این ویژگی در فرکانسی برابر با نرخ سمبل و فرکانس حامل، دامنه‌ای بزرگ‌تر از مقادیر همسایه خود دارد.

در ادامه، استخراج سه پارامتر فوق را با استفاده از شبیه‌سازی نشان می‌دهیم.

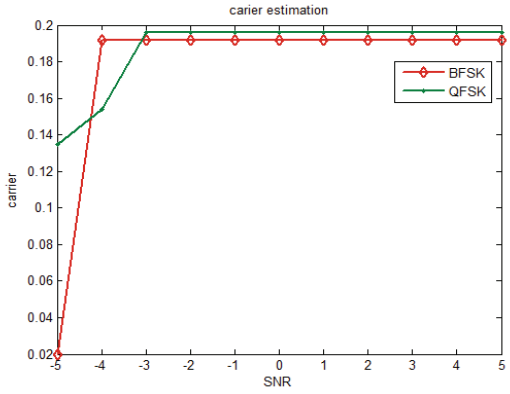
۴- شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی انجام شده برای سیگنال 2FSK و 4FSK مقدار کمولنت چرخشی مرتبه‌دوم درکانال AWGN در SNR=5 dB در شکل (۳) رسم شده است. پارامترهای بیش نمونه‌برداری[۹] برابر با ۱۰۰sample/symbol و فرکانس نمونه‌برداری[۱۰] برابر با ۱۰۰sample/sec می‌باشد. بنابراین نرخ سمبل[۱۱] برابر با نسبت فرکانس نمونه‌برداری بر بیش نمونه‌برداری و برابر با 1symbol/sec خواهد بود. فرکانس حامل سیگنال‌ها نیز برابر با 10 HZ و ضریب فرود[۱۲] شکل پالس کسینوسی افزایشی[۱۳] 0.35در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: کمولنت چرخشی مرتبه دوم سیگنال 4FSK,2FSK

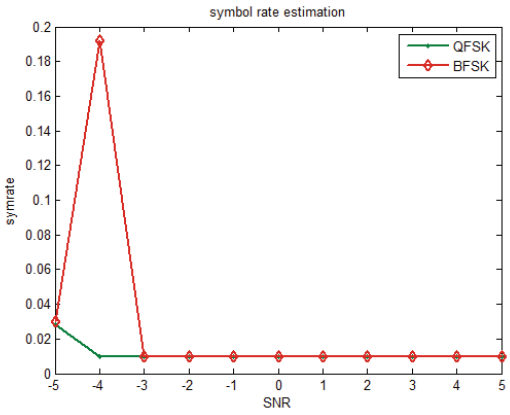
همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، هر دو سیگنال در فرکانسی برابر با $2\hat{f}_c=0.2$ اولین پیک را دارند که بیانگر فرکانس حامل 0.1 هرتز می‌باشد. همچنین پیک دوم در فرکانس 0.8 رخ داده است که دو برابر فرکانس حامل نرمالیزه شده می‌باشد.



شکل ۴: تخمین فرکانس حامل به ازای[-5:5]= SNR در کانال گوسی

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود برای دو سیگنال با مدولاسیون 2FSK, 4FSK فرکانس حامل تخمین زده شده است فرکانس نرمالیزه شده در شبیه‌سازی برابر با ۰,۲ می‌باشد. تخمین فرکانس حامل از SNR =-3 DB به بعد به مقدار واقعی، بسیار نزدیک می‌باشد.

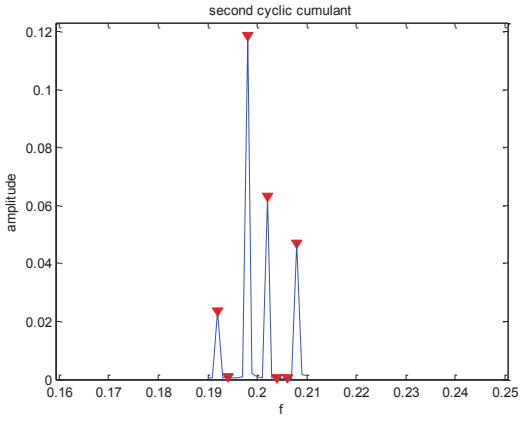
[۹] Over sampling
[۱۰] Sampling frequency (Fs)
[۱۱] Symbol rate
[۱۲] - Roll-off Factor
[۱۳] Root raise cosine



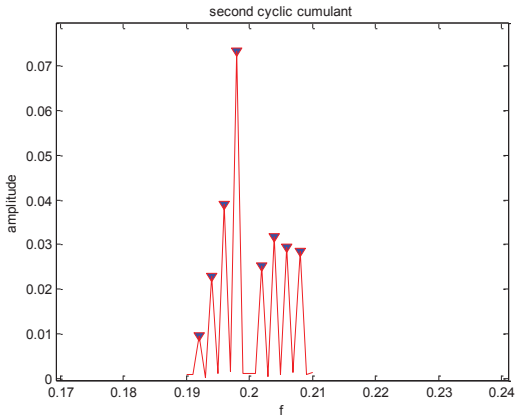
شکل ۵: تخمین نرخ سمبل به ازای[-5:5]= SNR در کانال گوسی

همان‌طور که در شکل۵ مشاهده می‌شود برای دو سیگنال با مدولاسیون 2FSK, 4FSK نرخ سمبل تخمین زده شده است، نرخ سمبل نرمالیزه شده در شبیه‌سازی برابر با ۰،۰۱ می‌باشد. تخمین نرخ سمبل از SNR =3dB به بعد به مقدار در نظر گرفته شده، بسیار نزدیک می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، تعداد پیک‌ها در اطراف فرکانس حامل برای مدولاسیون 2FSK برابر با ۴ و تعداد پیک‌ها برای سیگنال با مدولاسیون 4FSK برابر با ۸ می‌باشد.

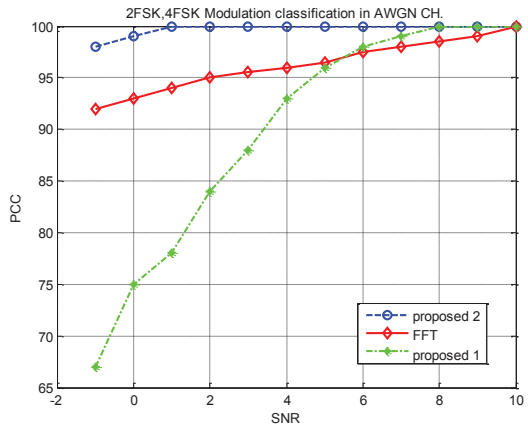


شکل۶: کمولنت چرخشی مرتبه دوم سیگنال2FSK,در اطراف فرکانس حامل



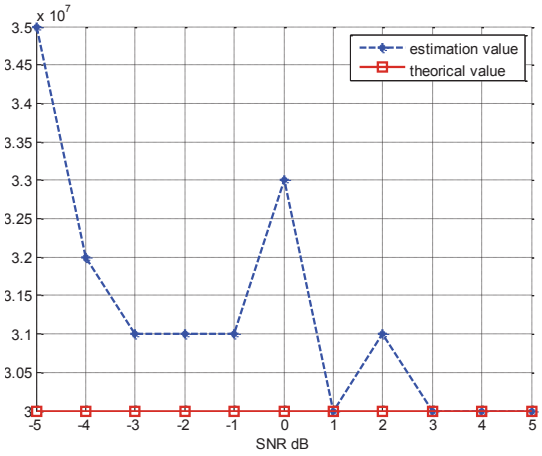
شکل۷: کمولنت چرخشی مرتبه دوم سیگنال4FSK,در اطراف فرکانس حامل

در شکل ۸به مقایسه نتایج روش‌های پیشنهادی در این مقاله و روش مقاله [7] ، پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی اول در SNR=8dB به موفقیت ۱۰۰ درصد رسیده و نتیجه روش FFT در [7] درSNR=-1dB ، به میزان ۲۰ درصد موفقیت بالاتری نسبت به روش پیشنهادی اول داشته است. همچنین روش پیشنهادی دوم نسبت به دو روش دیگر بهترین نتیجه را داشته و در SNR=1 dB به موفقیت ۱۰۰ درصد رسیده است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله نه‌تنها مغایرتی با [2] نداشته، بلکه علاوه بر تخمین پارامترهای نرخ سمبل و فرکانس حامل، توانایی تشخیص سیگنال‌های 2FSK,4FSK در کانال گوسی را خواهد داشت. نتایج مقاله [2]در شکل ۹ و ۱۰ آورده شده است.

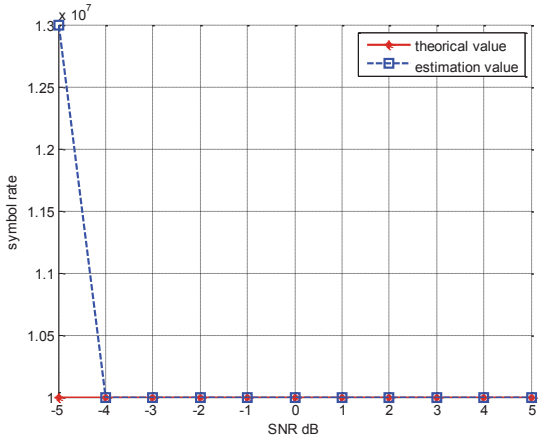


شکل ۸: مقایسه احتمال تشخیص صحیح مدولاسیون سیگنال‌های 2FSK, 4FSK در کانال گوسی باdB [-1:12] =SNR، با روش پیشنهادی و روش FFT در [7]

نتایج تخمین فرکانس حامل و نرخ سمبل سیگنال 2FSK به روش کمولنت چرخشی مرتبه دوم، در شکل‌های ۱۰و۹ آورده شده است.[2]



شکل ۹: تخمین فرکانس حامل به ازای[-5:5:]= SNR در کانال گوسی[2]



شکل ۱۰: تخمین نرخ سمبل به ازای[-5:5:]= SNR در کانال گوسی[2]

همان‌طور که در شکل ۱۰و۹ مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله نه‌تنها مغایرتی با نتایج [2] نداشته، بلکه با استفاده از ویژگی مذکور، می‌توان نوع مدولاسیون‌های 2FSK,4FSK را نیز تشخیص داد. نتایج تشخیص مدولاسیون‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله از ویژگی کمولنت چرخشی مرتبه دوم سیگنال‌های مدوله‌شده، به‌منظور تخمین سه پارامتر سیگنال به‌طور هم‌زمان استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز تئوری و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش درصورتی‌که سیگنال، بالای سطح نویز باشد، نسبت به نویز حساس نیست همچنین پیچیدگی محاسباتی آن کم و دقت آن بالا می‌باشد و امکان دسترسی به سه پارامتر اساسی سیگنال به‌منظور پردازش‌های اولیه برای دمدولاسیون سیگنال‌های مخابراتی غیر همکار را فراهم می‌آورد.

منابع

[1]A. Swami and B. M. Sadler, "Hierarchical digital modulation classification using cumulants," Communications, IEEE Transactions on, vol. 48, pp. 416-429, 2000.

[2] Jiao-long Yang ,Blind Estimation of Carrier Frequency and Symbol Rate Based on Cyclic Spectrum Density Institute of Tracking and Telecommunications Technology, China,2012

[3] O. A. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness and W. Su, "Survey of automatic modulation] classification techniques: classical approaches and new trends," IET Communications, vol. 1, no. 2, pp. 137-156, 2007.

[4] Design of Symbol-rate Estimation and Modulation Classi_cation Methods within an Autonomous Receiver Architecture for ESA Satellite 2000

[5] L. Freitas, C. Cardoso, F. Muller, J. Costa and A. Klautau, "Automatic modulation classification for cognitive radio systems: Results for the symbol and waveform domains,"in IEEE Latin-American Conference on Communications LATINCOM, 2009.

[6] TANG and Yi YU, Fast Algorithm for Symbol Rate Estimation Suhua Nonmembers2004

[7] محمدباقر بینایی، روش ساده و سریع در تشخیص اولیه مدولاسیون‌های دیجیتال با استفاده از تحلیل آماری تبدیل فوریه گسسته سیگنال ناشناخته دریافتی، شانزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران-۲۰۰۸