

بهبود عملکرد سیستم مخابراتی DS-CDMA با استفاده از دنباله گسترده آشوبی دوبعدی با نکاشت برنولی

محمدفرزان صباحی^۱
علی دهقان فرد^۲

چکیده

مهمترین هدف در سیستم‌های طیف گسترده، محافظت از اطلاعات در برابر تداخل و عدم دستیابی به اطلاعات توسط گیرنده‌های غیرخودی است. در سیستم‌های طیف گسترده DS-CDMA با ضرب داده در کدهای گسترده، خواسته‌های مزبور برآورده می‌شود. دنباله‌های آشوبی با داشتن ویژگی‌های منحصربفرد، در ساختن کدهای گسترده کاربرد فراوانی دارند. پیش از این استفاده از دنباله-برنولی یک بعدی به عنوان کد گسترده پیشنهاد شده است. ویژگی اصلی این دنباله داشتن خودهمبستگی منفی در تاخیر یک است که اجازه می‌دهد با طراحی مناسب، کارایی سیستم مبتنی بر این کدها نسبت به سایر کدهای شناخته شده افزایش یابد. از طرف دیگر استفاده از دنباله‌های آشوبی مختلط به عنوان کد گسترده نیز در مقالات متعددی مطرح شده است. در این مقاله استفاده از دنباله آشوبی برنولی دوبعدی به عنوان کد گسترده پیشنهاد شده است. بدین صورت هم می‌توان از مزایای دنباله برنولی و هم از درجه آزادی بیشتر در انتخاب کد، که در دنباله‌های مختلط امکان پذیر است، استفاده کرد. کیفیت یک سیستم طیف گسترده DS-CDMA چندکاربره همزمان و ناهمزمان با استفاده از این دنباله‌ها در کانال AWGN و همچنین کانال محوشدگی چند مسیره مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی‌ها حاکی از بهبود عملکرد در مقایسه با کدهای گسترده متداول موجود مثل دنباله‌های گولد و همچنین دنباله‌های گسترده مختلط مشابه است.

کلید واژه

سیستم DS-CDMA، مخابرات طیف گسترده، مخابرات آشوبی، دنباله آشوبی مختلط

^۱استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان، sabahi@eng.ui.ac.ir

^۲کارشناس ارشد برق مخابرات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر

تاریخ پذیرش: ۳۰ تیر ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: ۲۹ اسفند ۱۳۹۱

در سیستم‌های طیف گسترده اطلاعات اصلی در یک باند فرکانسی پهن، گسترده می‌شود. یکی از مهمترین روش‌های گسترده سازی طیف، دسترسی چندگانه تقسیم کد به روش دنباله مستقیم^۳ (DS-SS) است که در آن اطلاعات تمامی کاربران در یک باند فرکانسی و به صورت همزمان ارسال می‌شوند [۱-۴]. اطلاعات توسط دنباله‌هایی با ویژگی‌های خاص، که دنباله‌ها یا کدهای گسترده^۴ نامیده می‌شوند، گسترده می‌شوند. به عبارت دقیق‌تر به ازای هر بیت اطلاعات یک دنباله ارسال می‌شود. این دنباله مستقل از پیام اصلی ارسالی بوده و گیرنده از همان دنباله‌ی گسترده فرستنده برای بازیابی پیام ارسال شده استفاده می‌کند. در نتیجه‌ی استفاده از گسترده سازی، سیگنال ارسالی پهنای باند بیشتری به نسبت پیام اصلی اشغال می‌کند. ویژگی‌های دنباله‌های گسترده با همبستگی متقابل^۵ و خود همبستگی^۶ آن‌ها تعیین می‌شود. برای استفاده در کانال‌های چند مسیره، در حالت ایده‌آل کدها باید بر یکدیگر در تاخیرهای مختلف متعام یا نزدیک به متعام باشند. متداول‌ترین دنباله‌های مورد استفاده در DS-SS، دنباله‌های با طول حداکثر (m- sequence)، دنباله‌های گولد و کازامی [۱-۳] می‌باشند که توسط ثبات‌های انتقالی با فیدبک خطی^۷ (LFSR)، قابل پیاده‌سازی هستند [۳]. در دهه‌های اخیر دنباله‌های آشوبی^۸ هم به عنوان کدهای گسترده مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. دنباله‌های آشوبی، علیرغم قطعی بودن، خاصیت نویزگونه و رفتار نامنظمی از خود نشان می‌دهند که در عین حال از روابط ریاضی قطعی پیروی می‌نمایند. این دنباله‌ها با طول دلخواه قابل تولید می‌باشند، کاملاً غیر پررودیک بوده و به علت حساسیت شدید آنها به تغییرات جزئی در شرایط اولیه، می‌توان به تعداد بیشماری دنباله ایجاد کرد. دنباله‌های آشوبی تولیدی تقریباً متعام می‌باشند همچنین از مقدار همبستگی متقابل خوبی بهره می‌برند که آن‌ها را برای استفاده در سیستم‌های طیف گسترده ایده‌آل می‌نماید [۲]. دنباله‌های آشوبی برخلاف دنباله‌های رایج شبه نویز، به وسیله معادلات برگشتی ساده‌ای قابل ساخت می‌باشند. انواع مختلف این دنباله‌ها با ویژگی‌ها و پارامترهای مختلف در مراجع متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲] و [۵] و [۶]. در [۵] و [۶] نشان داده شده است که دنباله‌های آشوبی با تابع خودهمبستگی با کاهش نمایی می‌تواند عملکرد بهینه داشته باشد. در [۷] و [۸] دنباله آشوبی با خود همبستگی منفی در تاخیر یک به عنوان یک دنباله گسترده نزدیک به بهینه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

Direct Sequence Code Division Multiple Access^۳
 Spreading code^۴
 Cross Correlation^۵
 Auto-Correlation^۶
 Linear Feedback Shift Register^۷
 Chaotic sequences^۸

دنباله‌های آشوبی مختلط نیز در [۹] و [۱۰] معرفی شده و کیفیت سیستم DS-CDMA مبتنی بر آنها تحلیل شده است. در دنباله‌های دوبعدی یا مختلط، با استفاده از درجه آزادی بیشتر می‌توان به عملکرد بهتری از لحاظ همبستگی متقابل و میانگین خطای بیت دست یافت. این درجه آزادی شامل گستره انتخاب بالا از لحاظ تعداد و طول کدهاست. در [۹] از نگاشت مختلط ایکدا (Ikeda) برای تولید دنباله‌های آشوبی دوبعدی استفاده شده است.

در یک سیستم DS-CDMA چند کاربره غیر همزمان (نظیر خط معکوس در سیستمهای سلولی) می‌توان تداخل میانگین دیده شده توسط هر کاربر را فقط با میانگین توابع خودهمبستگی کدها بیان کرد [۱۱]. به این ترتیب می‌توان با تنظیم تابع خودهمبستگی، کدهای مناسبی طراحی نمود. در حقیقت همین ایده در [۷] برای طراحی دنباله مناسب آشوبی یک بعدی بکار گرفته شده است. در مقاله‌ای که پیش رو دارید، ایده استفاده از دو دنباله‌ی آشوبی برنولی برای تشکیل یک دنباله دوبعدی ارائه شده است. نشان می‌دهیم تابع خودهمبستگی دنباله دوبعدی، در میانگین رفتاری شبیه دنباله یک بعدی دارد. انتظار می‌رود از مجموعه دنباله‌های مختلط جدید بتوان دنباله‌هایی با همبستگی متقابل بهتر نسبت به حالت یک بعدی انتخاب نمود که سبب کاهش نرخ خطا در گیرنده و همچنین افزایش ظرفیت کانال شود.

بخش‌های مختلف این مقاله به ترتیب ذیل خواهند بود، در بخش دوم ابتدا به بررسی سیستم‌های DS-CDMA با کد گسترده‌ی دوبعدی خواهیم پرداخت. در بخش سوم دنباله برنولی را ارزیابی و سپس در بخش چهارم به معرفی دنباله پیشنهادی می‌پردازیم. در بخش پنجم تحلیل و مقایسه شبیه‌سازی کامپیوتری سیستم DS-CDMA با کدهای گسترده آشوبی برنولی را با کدهای متداول دیگر در حضور کانال‌های AWGN و رایلی محوشونده به مقایسه خواهیم گذاشت و بخش ششم به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

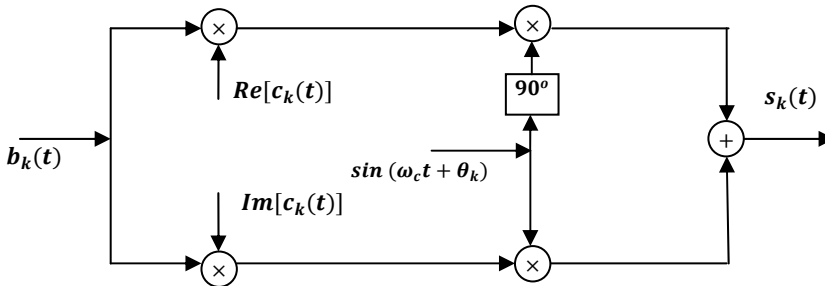
ساختار سیستم DS-CDMA با کد گسترده دو بعدی

شکل (۱) دیاگرام کلی فرستنده‌ی یک سیستم DS-CDMA مختلط را نشان می‌دهد. داده ارسالی کاربر k ام به شکل $b_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_k^n p(t - nT_b)$ نشان داده می‌شود که $b_k^n \in \{\pm 1\}$ و $c_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_k^n p(t - nT_c)$ دنباله گسترده کاربر k ام است و $c_k^n \in \{\pm 1 \pm j\}$. $p(0)$ تابع شکل دهنده مستطیلی است و نسبت $\frac{T_b}{T_c}$ به عنوان ضریب گسترش شناخته می‌شود. در گیرنده برای

بازیابی اطلاعات گسترده شده، پس از انتقال اطلاعات به باند پایه، داده دریافتی را (با فرض همزمان سازی کامل کد) در مزدوج مختلط دنباله گسترده ضرب کرده و پس از تجمیع انرژی و نمونه برداری، مقدار نمونه برداری شده را برای آشکارسازی بیتها با سطح آستانه صفر مقایسه می-کنیم. سطح آستانه فقط به قسمت حقیقی اطلاعات اعمال می-شود زیرا در صورت خواص خودهمبستگی مناسب دنباله گسترده، انرژی خروجی در قسمت حقیقی آن متمرکز گردیده است. در صورت وجود همزمانی بین کاربران (مثلا در خط مستقیم در سیستم سلولی)، در صورتی که تعداد کاربران فعال در کانال K و دامنه سیگنال اطلاعات ارسالی کاربر k ام، z_k باشد سیگنال دریافتی مربوط به کاربر k ام را پس از نمونه بردار می-توان به صورت زیر نشان داد:

$$y[n] = 2z_k b_k^n + \sum_{l=1, l \neq k}^K z_l (\rho_{R,l} + \rho_{I,l}) b_l^n + v[n] \quad (1)$$

که در آن نویز کانال و ρ تابع همبستگی متقابل دنباله‌های گسترده با دنباله k ام می‌باشد که شامل دو قسمت حقیقی و موهومی خواهد بود. $\rho_{R,l}$ و $\rho_{I,l}$ به ترتیب مقادیر همبستگی متقابل کاربر l ام با کاربر k ام، مربوط به قسمت‌های حقیقی و موهومی دنباله‌های گسترده است. در سیستم ناهمزمان (مثلا در خط معکوس در سیستم سلولی) مقدار همبستگی متقابل تابعی از اختلاف زمان سیگنال دریافت شده k ام با سایر سیگنال‌هاست و باید از توابع همبستگی پاره‌ای استفاده شود.



شکل ۱. بلوک دیاگرام فرستنده‌ی سیستم DS-SS با کدهای گسترده مختلط

نشان داده شده است که در این حالت نیز می‌توان SNR متوسط دریافتی گیرنده را با مقادیر $\rho_{R,I}$ و $\rho_{I,I}$ بیان نمود [۱۱].

اگر قسمت‌های حقیقی و موهومی از نظر علامت مخالف یکدیگر باشند، یکدیگر را خنثی خواهند کرد و تداخل چند کاربره^۹ کاهش خواهد یافت. بطور معمول مجموعه کدهای مرسوم در سیستم‌های DS-SS برای هر ضریب گسترش مشخص، تعداد محدودی کد با خواص همبستگی مناسب پیشنهاد می‌کنند. وجود درجه آزادی در انتخاب کد گسترده یک مزیت عمده برای یک مجموعه کد است. در صورت استفاده از دنباله‌های آشوبی، با استفاده از شرایط اولیه متفاوت تعداد بی‌شماری دنباله می‌توان تولید کرد و بنابراین انتخاب دنباله‌هایی با شرایط فوق به راحتی امکان پذیر است.

دنباله آشوبی برنولی یک‌بعدی با خودهمبستگی منفی

تداخل میانگین دیده شده توسط کاربر k ام از سوی کاربر i ام در یک سیستم DS-SS با ضریب گسترش N به صورت زیر به دست می‌آید [۵ و ۱۱]:

$$r_{k,i} = 2N^2 + 4 \sum_{l=1}^{N-1} A_k(l) A_i(l) + \sum_{l=1-N}^{N-1} A_k(l) A_i(l+1) \quad (2)$$

که $A_k(l)$ تابع خودهمبستگی دنباله گسترده‌ی حقیقی $\{c_k^{(n)}\}$ (برای $n = 0, 1, \dots, N-1$) استفاده شده برای کاربر k ام می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$A_k(l) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1-l} c_k^{(n)} c_k^{(n+l)} & (0 \leq l \leq N-1) \\ \sum_{n=0}^{N-1+l} c_k^{(n-l)} c_k^{(n)} & (1-N \leq l \leq 0) \\ 0 & (|l| > N) \end{cases} \quad (3)$$

با استفاده از معادله (۲)، میانگین نرخ سیگنال به نویز در خروجی گیرنده همبسته برای کاربر i ام از میان K کاربر در کانال AWGN به صورت زیر خواهد بود [۱۱]:

$$SNR_i = \left\{ \frac{1}{6N^3} \sum_{k=1, k \neq i}^K r_{k,i} + \frac{N_0}{2E_b} \right\}^{-1} \quad (4)$$

که $\frac{N_0}{2}$ توان نویز سفید و E_b انرژی سیگنال کاربر i ام در هر بیت است. به عبارت دیگر می‌توان گفت کیفیت سیستم مستقیماً با تابع خودهمبستگی مرتبط است. دنباله‌های آشوبی مختلفی با خواص خودهمبستگی مناسب سیستم‌های DS-CDMA معرفی شده‌اند. به‌طور کلی دنباله‌های آشوبی با استفاده از نگاشت‌های برگشتی که خواص منحصر به فردی دارند تولید می‌شوند. یکی از این خواص، حساسیت شدید به مقادیر اولیه است بطوریکه برای دو مقدار اولیه به حد دلخواه نزدیک به هم، پس از چندین بار اعمال تابع نگاشت، مقادیر خروجی از یکدیگر فاصله نسبی زیادی پیدا خواهند کرد. یکی از نگاشت‌های مورد استفاده برای تولید دنباله آشوبی، نگاشت برنولی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau(x_{n+1}) = \begin{cases} 2x_n & 0 \leq x < 0.5 \\ 2x_n - 1 & 0.5 \leq x < 1 \end{cases} \quad (5)$$

با انتخاب نقطه‌ی اولیه‌ی $x_0 \in (0,1)$ دنباله آشوبی $\{x_n = \tau^n(x_0)\}$ با مقادیر حقیقی بدست می‌آید که منظور از $\tau^n(0)$ ، n بار اعمال نگاشت $\tau(0)$ است. برای تشکیل یک کد گسترده، یک تابع مبدل باینری برای تبدیل مقادیر پیوسته خروجی (یعنی x_n ها) به مقادیر -1 و $+1$ استفاده می‌شود. تابع مبدل باینری استفاده شده در اینجا به صورت زیر تعریف شده است [۷]:

$$B(x) = \theta_{\frac{1}{8}}(x) - \theta_{\frac{3}{8}}(x) + \theta_{\frac{5}{8}}(x) \quad (6)$$

که در آن $\theta_t(x)$ تابع آستانه به شکل زیر است:

$$\theta_t(x) = \begin{cases} -1 & (x < t) \\ 1 & (x \geq t) \end{cases} \quad (7)$$

البته استفاده از توابع باینری دیگر هم امکان پذیر می‌باشد [۱۲]. تابع خودهمبستگی میانگین برای دنباله باینری بدست آمده به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]

$$C(l) = E [B(\tau(x))B(\tau^l(x))] = \int B(\tau(x))B(\tau^l(x))f(x)dx \quad (8)$$

که در آن $f(\cdot)$ تابع توزیع^{۱۰} نگاشت $\tau(\cdot)$ و محدوده انتگرال گیری، بازه $[0,1]$ است. در [۱۴] نشان داده شده است که برای نگاشت برنولی یک بعدی و تابع باینری $B(0)$ ، شرایط $f(x) = 1$ و $E[B(\tau^l(x))] = 0$ برقرار است. اگر همه کاربران از دنباله‌های برنولی ساخته شده به طریق فوق استفاده کنند، و نقطه‌ی اولیه‌ی دنباله‌های برنولی کاربران مختلف بطور آماری مستقل از یکدیگر باشد، با میانگین‌گیری از رابطه (۲) می‌توان پارامتر تداخل میانگین^{۱۱} (AIP) برای هر کاربر به شکل رابطه (۹) بدست آورد.

$$r = 2N^2 + 4 \sum_{l=1}^{N-1} (N-l)^2 C(l) + 2 \sum_{l=1}^{N-1} (N-l)(N-l+1) C(l) C(l-1) \quad (9)$$

مقدار پارامتر تداخل میانگین نرمالیزه شده بصورت $R = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{r}{2N^2}$ تعریف می‌شود که می‌تواند معیاری برای بررسی عملکرد کدهای گسترده باشد. روشن است که برای دنباله‌های کاملاً تصادفی $C(l)$ به شکل $\delta(0)$ بوده و $R = 1$ است. در [۶] دنباله‌های آشوبی دارای تابع خودهمبستگی با کاهش نمایی معرفی شده و عملکرد بهتر آن‌ها نسبت به کدهای شبه نویز (که تابع خودهمبستگی به شکل $\delta(\cdot)$ دارند) نشان داده شده است. در این دنباله‌ها $C(l) = \lambda^l$ است ($0 < |\lambda| < 1$) و به راحتی از رابطه (۹) می‌توان دید که $R = \frac{\lambda^2 + \lambda + 1}{1 - \lambda^2}$. مقدار R در $\lambda = 2 + \sqrt{3}$ به حداقل مقدار خود یعنی $R = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866$ می‌رسد که مقدار کمتری از دنباله‌های کاملاً تصادفی است. در [۶] همچنین نحوه ایجاد دنباله آشوبی با این تابع خودهمبستگی بیان شده است. در صورتی که تابع خودهمبستگی دارای مقدار منفی در تاخیر یک و مقدار صفر در بقیه مقادیر باشد، می‌توان نشان داد که عملکرد آن بسیار نزدیک به دنباله‌های دارای تابع خودهمبستگی با کاهش نمایی است [۷] و [۱۴]. در حقیقت در چنین دنباله‌هایی داریم:

$$C(l) = \begin{cases} 1 & (l = 0) \\ \varepsilon & (l = 1) \\ 0 & (l \geq 2) \end{cases} \quad (10)$$

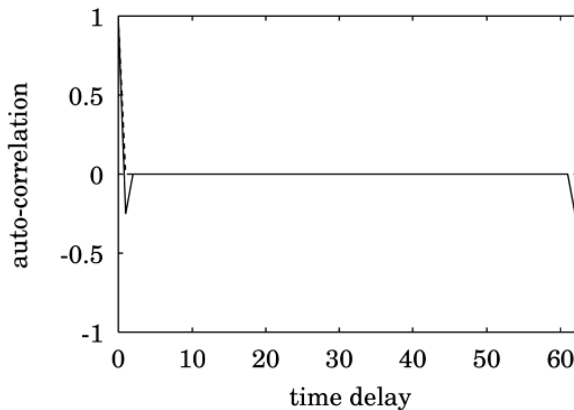
و پارامتر تداخل میانگین نرمالیزه شده با استفاده از (۹) بصورت $R = 2\varepsilon^2 + \varepsilon + 1$ محاسبه می‌شود. کمترین مقدار R به ازای $\varepsilon = -\frac{1}{4}$ و برابر $R = \frac{7}{8} = 0.875$ بدست می‌آید که بسیار نزدیک به مقدار

^{۱۰} Invariant Density Function
^{۱۱} Average Interference Parameter

بهینه برای دنباله‌های آشوبی دارای تابع خودهمبستگی با کاهش نمایی (یعنی $R = 0.866$) است. در [۱۵] با استفاده از نگاشت برنولی دنباله‌ای طراحی شده است که دارای تابع خودهمبستگی میانگین به شکل رابطه (۱۰) با $\varepsilon = -\frac{1}{4}$ است. نمونه‌ای از شکل تابع خودهمبستگی دنباله برنولی در شکل ۲ نشان داده شده است. کیفیت سیستم DS-CDMA با استفاده از این کد در [۷] بررسی و خواص مناسب آن بیان شده است.

دنباله گسترده‌ی برنولی دوبعدی

در صورتی که از دنباله‌های دوبعدی یا مختلط استفاده شود، درجه آزادی بیشتری برای انتخاب دنباله‌هایی که خاصیت خودهمبستگی یا همبستگی متقابل مناسب داشته باشند ایجاد می‌شود. در اینجا با توجه به خصوصیات مناسب نگاشت برنولی، از دو دنباله‌ی برنولی با شرایط اولیه متفاوت، یا تولید شده بوسیله‌ی توابع مبدل باینری متفاوت، به عنوان بخش‌های حقیقی و موهومی یک دنباله-ی دوبعدی استفاده می‌کنیم. ابتدا نشان می‌دهیم دنباله مختلط تشکیل شده به این صورت نیز از خاصیت خودهمبستگی منفی برخوردار است. دو دنباله برنولی ساخته شده توسط نگاشت برنولی با شرایط اولیه متفاوت $x, y \in [0,1]$ و اعمال نگاشت باینری $B(0)$ طبق رابطه (۶) را در نظر می‌گیریم.



شکل ۲. تابع خودهمبستگی میانگین دنباله برنولی به طول ۶۳ [۱۴]

فرض می‌کنیم شرایط اولیه x و y به صورت آماری مستقل از یکدیگر باشند. دنباله مختلط باینری بدست آمده را به شکل رابطه‌ی (۱۱) تعریف می‌کنیم.

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} (B(\tau^n(x)) + jB(\tau^n(y))) \right\}_{n=0}^{N-1} \quad (11)$$

ضریب $\frac{1}{\sqrt{2}}$ برای داشتن توان مشابه با دنباله حقیقی در نظر گرفته شده است. تابع خود همبستگی میانگین به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C(l) = \frac{1}{2} E \left[(B(\tau(x)) + jB(\tau(y))) (B(\tau^l(x)) - jB(\tau^l(y))) \right] \quad (12)$$

$$= \frac{1}{2} \int (B(\tau(x)) + jB(\tau(y))) (B(\tau^l(x)) - jB(\tau^l(y))) f(x) f(y) dx dy$$

که در آن $f(0)$ تابع توزیع^۴ نگاشت $\tau(0)$ و محدوده انتگرال گیری، بازه‌ی $[0,1]$ است. همانطور که قبلاً گفته شد برای نگاشت برنولی یک بعدی و تابع باینری $B(0)$ ، شرایط $f(x) = 1$ و $E[B(\tau^l(x))] = 0$ برقرار است. با توجه به استقلال x و y و قطعی بودن نگاشت برنولی می‌توان نوشت:

$$C(l) = \frac{1}{2} (E[B(\tau(x))B(\tau^l(x))] + E[B(\tau(y))B(\tau^l(y))]) \quad (13)$$

با توجه به رابطه (۱۰) برای دنباله‌های برنولی یک بعدی ساخته شده به این طریق، می‌توان دید که همین رابطه برای دنباله مختلط نیز برقرار است و بنابراین، بصورت میانگین، همان رفتار مناسب دنباله‌ی یک بعدی برنولی را از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است رفتار مناسب دنباله‌ی یک بعدی برنولی، در میانگین بدست می‌آید. در سیستم‌های عملی باید تعداد محدودی کد گسترده انتخاب و استفاده شود. در دنباله‌ی دو بعدی پیشنهاد شده، امکان بیشتری برای انتخاب مجموعه دنباله‌ها با همبستگی متقابل کم وجود دارد.

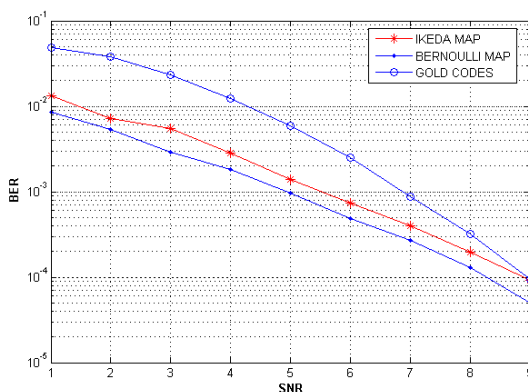
برای داشتن مجموعه‌ای از دنباله‌های مناسب برای استفاده در سیستم چند کاربره، از روشی مشابه [۹] استفاده می‌کنیم. با استفاده از شرایط اولیه متفاوت (یا استفاده از توابع باینری متفاوت) تعداد زیادی دنباله با نگاشت برنولی تولید می‌کنیم. بطور تصادفی، دنباله مختلط اولین کاربر را با انتخاب دو دنباله از مجموعه، به عنوان بخش‌های حقیقی و موهومی، تشکیل می‌دهیم. همبستگی متقابل سایر دنباله‌ها با قسمت حقیقی و موهومی این دنباله را محاسبه کرده و براساس مثبت یا منفی بودن مقدار تابع خودهمبستگی متقابل، دنباله‌ها را به دو گروه تقسیم می‌کنیم. هر گروه را به

طور صعودی مرتب کرده و اولین عضو هر گروه، که دارای کمترین همبستگی متقابل است، را به عنوان مقادیر حقیقی و موهومی دنباله بعدی انتخاب می‌کنیم. بدین ترتیب دنباله جدید در هر دو بخش حقیقی و موهومی دارای همبستگی متقابل کمی با دنباله قبلی خواهد بود و بعلاوه، به دلیل مختلف‌العلامت بودن، دو مقدار همبستگی همدیگر را نیز تا حدودی خنثی خواهند کرد. این روند به همین ترتیب ادامه پیدا می‌کند. در مراحل بعدی، میانگین همبستگی متقابل با دنباله‌های قبلی ملاک انتخاب دنباله جدید خواهد بود.

نتایج شبیه‌سازی

سیستم همزمان

شبیه‌سازی کامپیوتری برای بررسی و مقایسه دنباله‌ی گسترده پیشنهادی با سایر دنباله‌های متداول استفاده شده در سیستم مخابراتی DS-CDMA همزمان به‌کار برده شده است. برای مقایسه عادلانه با کدهای حقیقی مثل گولد، باید نرخ گسترش کد مختلط نصف کد حقیقی باشد تا دو سیستم از پهنای باند یکسان برخوردار باشند. به همین دلیل در این شبیه‌سازی، دنباله آشوبی برنولی مختلط با طول ۳۱ چپ به عنوان کدگسترده فرض شده است. همچنین کد آشوبی مختلط ایکدا با طول ۳۱ چپ، که در [۹] معرفی شده است، و کد گولد با طول ۶۳ چپ برای مقایسه استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌ها نرخ خطای بیت (BER) در سیستم همزمان دارای مدولاسیون BPSK و نویز گوسی سفید مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل ۳ نرخ خطای بیت در کانال AWGN را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود دنباله آشوبی برنولی مختلط عملکرد بهتری نسبت به دنباله‌ی گولد و ایکدا در شرایط مشابه دارد.

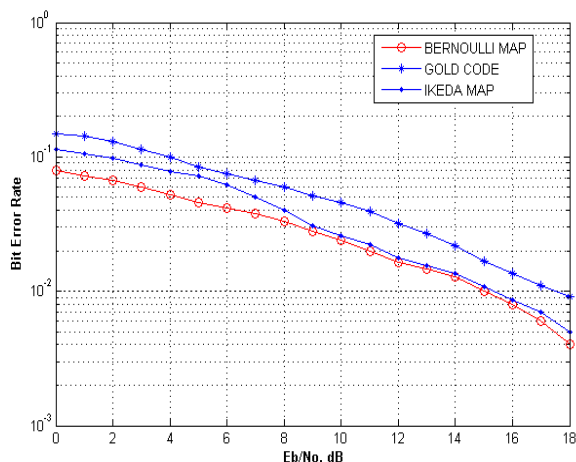


شکل ۳. نرخ خطای بیت در سیستم DS-CDMA همزمان در کانال گوسی

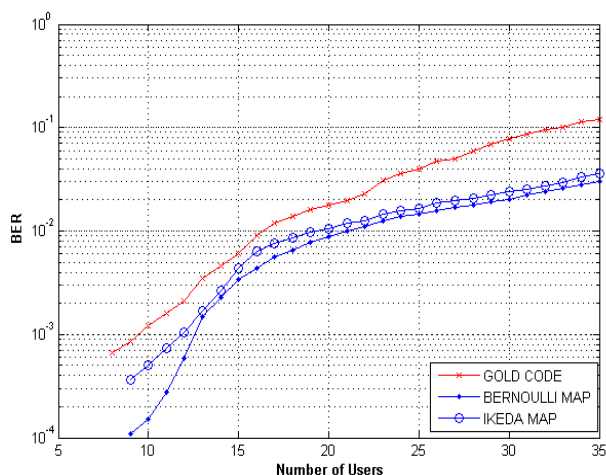
شکل ۳. نرخ خطای بیت در سیستم DS-CDMA همزمان در کانال گوسی

شکل ۴ نتیجه شبیه‌سازی مشابهی را در کانال چند مسیره با محوشدگی رایلی نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی کانال از ۳ مسیر با تاخیرهایی به اندازه‌ی طول ۱ بیت استفاده شده است. ضرایب کانال، متغیرهای گوسی مختلط متقارن و چرخشی با توان های ۰/۷ و ۰/۲ و ۰/۱ در نظر گرفته شده اند. سایر شرایط شبیه‌سازی مانند قبل فرض می‌شود. مقدار نرخ خطای بیت در منحنی‌های بدست آمده نسبتاً زیاد است و برای رسیدن آن به مقدار مطلوب می‌بایست از کدگذاری کانال استفاده - شود. البته در شکل ۴ از کدگذاری استفاده نشده است. همانگونه که دیده می‌شود کدهای گسترده مختلط نسبت به دنباله گولد عملکرد بهتری دارند.

در شکل ۵ میانگین نرخ خطای بیت کاربران بر حسب تعداد کاربر فعال در کانال AWGN نشان داده شده است. برای بررسی تاثیر تداخل کاربران، کانال را بدون نویز در نظر گرفته‌ایم. همانطور که مشاهده می‌شود ظرفیت سیستم با استفاده از دنباله برنولی مختلط بهبود پیدا کرده است.



شکل ۴. نرخ خطای بیت در سیستم DS-CDMA همزمان در کانال محوشدگی رایلی



شکل ۵. میانگین نرخ خطای بیت به ازای تعداد کاربران کانال

سیستم ناهمزمان

مسیر فراسو (uplink) یک سیستم مخابراتی بیسیم، لزوماً ناهمزمان است. بنابراین ارزیابی سیستم پیشنهادی در شرایط کانال ناهمزمان نیز ضروری به نظر می‌رسد. در یک سیستم DS-CDMA چند کاربهره غیر همزمان (نظیر خط معکوس در سیستمهای سلولی) می‌توان تداخل میانگین دیده شده توسط هر کاربر را فقط با میانگین توابع خودهمبستگی کدها بیان کرد [۱۱]. به این ترتیب می‌توان با تنظیم تابع خودهمبستگی کدهای مناسبی طراحی نمود. همانگونه که گفته شد همین ایده در [۷] برای طراحی دنباله مناسب آشوبی یک بعدی بکار گرفته شده است. دنباله‌ی آشوبی دوبعدی معرفی شده در این مقاله نیز از همان خواص مناسب دنباله‌های یک بعدی [۷] برخوردار است و همان‌طور که در بخش ۴ نشان داده شده است تابع خودهمبستگی دنباله دوبعدی، در میانگین رفتاری شبیه دنباله یک بعدی دارد. بنابراین انتظار می‌رود با روش گفته شده در بخش ۴ بتوان دنباله‌هایی با همبستگی متقابل بهتر نسبت به حالت یک بعدی انتخاب نمود که سبب کاهش نرخ خطا در گیرنده و همچنین افزایش ظرفیت کانال در خط معکوس شود.

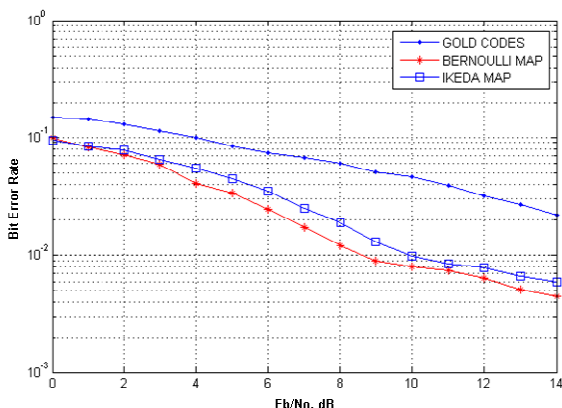
سیستم ناهمزمان با حضور ۱۰ کاربر شبیه‌سازی می‌گردد. با توجه به شکل (۱) سیگنال کاربر k ام را می‌توان بصورت $s_k(t) = z_k b_k(t) \cos(\omega_c t + \varphi_k(t) + \theta_k)$ نشان داد. مدولاسیون BPSK فرض

می‌شود و $\varphi_k(t)$ نشان دهنده‌ی اثر کد مختلط $c_k(t)$ است. سیگنال دریافتی در خط معکوس را نیز می‌توان بصورت زیر بیان کرد.

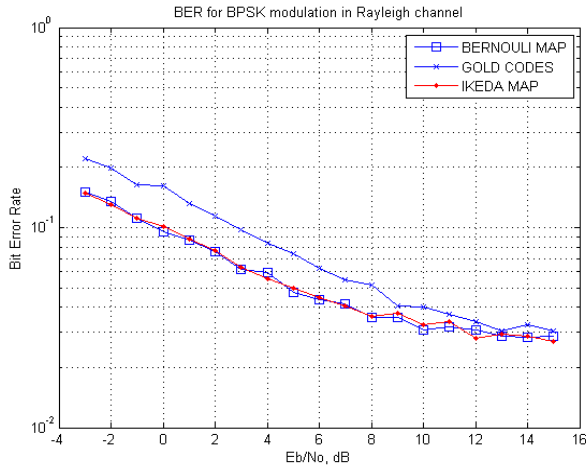
$$r(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t - \tau_k) + v(t) \quad (14)$$

که در آن τ_k و θ_k به ترتیب تاخیر در زمان دریافت و فاز اسیلاتور فرستنده‌ی k ام است. $v(t)$ نیز نویز کانال است. گیرنده‌ی کاربر i ام با اعمال فیلتر منطبق بر $s_i(t)$ پیاده سازی می‌شود. بدون از دست دادن عمومیت می‌توان فرض کرد $\tau_i = 0$ و $\theta_i = 0$ و سایر τ_k ها و θ_k ها (برای $k \neq i$) به ترتیب دارای توزیع یکنواخت در بازه های $[0, T_b]$ و $[0, 2\pi]$ هستند. سایر شرایط کانال AWGN و رایلی را مطابق قبل در نظر می‌گیریم. از سه نوع کد گسترده در شرایط ناهمزمان کانال استفاده می‌کنیم. شکل (۶) نرخ خطای بیت در سیستم DS-CDMA ناهمزمان در کانال AWGN را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود بهبود کیفیت سیستم DS-CDMA ناهمزمان با استفاده از دنباله‌های آشوبی مختلط و همچنین بهبود استفاده از دنباله دو بعدی پیشنهادی نسبت به دنباله یکدا مشخص می‌باشد.

شکل (۷) نیز نرخ خطای بیت در سیستم DS-CDMA ناهمزمان در کانال محوشدگی رایلی با همان پارامترهای ذکر شده در بخش ۵-۱ را نشان می‌دهد. مقدار نرخ خطای بیت در منحنی‌های بدست آمده نسبتاً زیاد است و همانگونه که انتظار می‌رود یک مقدار غیر قابل کاهش خطا نیز در اثر ISI وجود دارد. بدیهی است که کدگذاری کانال می‌تواند هر دو مشکل را مرتفع کند.



شکل ۶. نرخ خطای بیت در سیستم DS-CDMA ناهمزمان در کانال AWGN



شکل ۷. نرخ خطای بیت در سیستم DS-CDMA ناهمزمان در کانال محوشدگی رابلی

در شکل (۷) دیده می‌شود که عملکرد دو دنباله آشوبی مختلط ایکدا و برنولی در کانال ناهمزمان تقریباً مشابه و برتر از دنباله گولد است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله دنباله‌ی آشوبی برنولی دوبعدی برای تولید دنباله گسترده مختلط برای استفاده در سیستم DS-CDMA معرفی گردید. دنباله‌های مختلط از درجه آزادی بیشتری برای انتخاب مجموعه مناسب سیستم چندکاربره برخوردارند. دنباله برنولی یک بعدی به همراه تابع مبدل مقدار پیوسته به باینری، پیش از این برای طراحی کد گسترده تقریباً بهینه به کار گرفته شده است. خواص مناسب این دنباله ریشه در مقدار منفی خودهمبستگی آن در تاخیر یک دارد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که ترکیب دو دنباله برنولی با شرایط اولیه یا تابع مبدل باینری متفاوت، و تشکیل یک دنباله دوبعدی مختلط می‌تواند به بهبود عملکرد نسبت به کدهای گسترده مرسوم نظیر کدهای گولد، و یا کدهای مختلط مشابه، نظیر کدهای ایجاد شده با نگاشت ایکدا، منجر شود. دلیل اصلی بهبود عملکرد را می‌توان در خواص مناسب تابع خودهمبستگی و همچنین درجه‌ی آزادی بیشتر در انتخاب کدهای با خواص مناسبتر در بین کدهای مختلط خلاصه کرد. نتایج بدست آمده، هم در سیستم همزمان و هم در سیستم ناهمزمان، تایید کننده‌ی کاهش نرخ خطا و افزایش ظرفیت است.

- [1] J. Proakis, M. Salehi "Digital Communications", McGraw Hill, 2008.
- [2] P. Stavroulakis, "CHAOS APPLICATIONS IN TELECOMMUNICATIONS", CRC Press, 2005.
- [3] D. Torrieri, "Principles of Spread-Spectrum Communication Systems", Springer, 2nd Edition, 2011
- [4] R. Rovatti, G. Mazzini, G. Setti, "On the ultimate limits of chaos-based asynchronous DS-CDMA-I: basic definitions and results" IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2004, pp 1336 – 1347.
- [5] A. Tsuneda, "Design of binary sequences with tunable exponential auto-correlations and run statistics based on one-dimensional chaotic maps", IEEE Trans. Circuits and systems-I, 2005, vol.52, no.2, pp.454–462.
- [6] R. Rovatti and G. Mazzini, "Interference in DS-CDMA Systems with Exponentially Vanishing Autocorrelations: Chaos-Based Spreading Is Optimal," *Electronics Letters*, 1998, Vol.34, No.20, pp.1911–1913.
- [7] A. Tsuneda, , Y. Miyazaki, "Binary Spreading Sequences with Negative Auto-Correlation Based on Chaos Theory and Gold Sequences for Application to Asynchronous DS/CDMA Communications" IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2010, Volume E93.A, Issue 11, pp. 2307-2311.
- [8] L. Cong and L. Shaoqian, "Chaotic Spreading Sequences with Multiple Access Performance Better Than Random Sequences" IEEE transactions on circuits and systems: fundamental theory and applications ,March 2000, vol. 47, no. 3.
- [9] A. P. Kurian, S. Puthusserypady, S. M. Htut, "Performance Enhancement of DS/CDMA System Using Chaotic Complex Spreading Sequence" IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, MAY 2005., VOL. 4, NO. 3.
- [10] G. Mazzini, G. Setti, and R. Rovatti, "Chaotic Complex Spreading Sequences for Asynchronous DS-CDMA—Part I: System Modeling and Results", *IEEE Trans. Circuits and Systems Part I*, VOL. 44, 937-947, Oct 1997, pp 937-947.
- [11] M. B. Pursley, "Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication—part I: System analysis," IEEE Trans. Comm. , 1977, vol. 25, pp. 795–799.
- [12] A. Tsuneda and Y. Miyazaki, "Performance Evaluation of LFSR-Based Spreading Sequences with Negative Auto-correlation Designed by Chaos Theory of Modulo-2 Added Sequences" IEEE conference, Circuit theory and design, Aug 2009, pp 141-144.
- [13] T. Kohda and A. Tsuneda, "Statistics of Chaotic Binary Sequences ", IEEE Trans., Information Theory, 1997, vol.43, no.1, pp.104–112.
- [14] A. Tsuneda, D. Yoshioka, and T. Hadate, "Design of Spreading Sequences with Negative Auto-Correlations Realizable by Nonlinear Feedback Shift Registers" ISSSTA 2004, Sydney, Australia, 30 Aug. , pp330-334

- [15] A. Tsuneda, Y. Miyazaki, "Performance Evaluation of Spreading Sequences with Negative Auto-correlation Based on Chaos Theory and Gold Sequences" Signal Design and its Applications in Communications. Fourth International Workshop on, 2009.