

به نام خداوند بخشنده مهربان



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

پروژه درس سیگنال و سیستم کارشناسی

عنوان پروژه:

رادیو دیجیتال

نگارش

مصطفی کویری-پویان حسابی

استاد

دکتر خاکپور

بهمن ماه ۱۴۰۱

فهرست مطالب

۳	چکیده.....
۳	واژه‌های کلیدی:.....
۴	مدولاسیون فرکانس.....
۵	ریاضیات مدولاسیون فرکانس.....
۷	شاخص مدولاسیون فرکانس.....
۸	مدولاسیون باند باریک.....
۹	مدولاسیون پهن باند.....
۱۰	توابع بسل.....
۱۱	قاعده کارسون.....
۱۲	کاهش نویز.....
۱۳	کاربردها.....
۱۴	مزایای و معایب مدولاسیون فرکانس.....
۱۴	رادیو دیجیتال FM.....

فهرست اشکال

۶	شکل ۱.....
۷	شکل ۲.....
۹	شکل ۳.....

چکیده

فایل ورودی ۱۰ ثانیه از سیگنال دریافت شده به وسیله آنتن با نرخ نمونه برداری ۴۸۰ کیلو هرتز است. فایل ورودی یک فایل متنی است که در هر خط یک عدد از اعداد سیگنال ورودی قرار گرفته است. برنامه در ابتدا فایل ورودی را خوانده و منتظر یک عدد که همان فرکانس شبکه رادیویی مد نظر کاربر است می شود و بعد سیگنال ورودی را از فیلتری میان گذر با فرکانس گذری که کاربر وارد کرده رد می کند سپس سیگنال را با انتقال فرکانس به محدوده شنوایی گوش انسان می آورد و در نهایت صوت تشکیل شده را پخش می کند و منتظر ورود عددی جدید از کاربر نیز می ماند.

واژه‌های کلیدی:

نرخ نمونه برداری، فیلتر میانگذر، مدولاسیون FM

مدولاسیون فرکانس

مدولاسیون فرکانس (Frequency Modulation) یا FM مبحثی بسیار مهم در علم مخابرات و پردازش سیگنال است که به فرآیند کدگذاری اطلاعات موجود در سیگنال پیام از طریق تغییر فرکانس لحظه‌ای موج حامل اطلاق می‌شود.

داده‌های دیجیتال می‌توانند از طریق مدولاسیون فرکانس نیز کدگذاری شده و سپس به مسافت‌های طولانی ارسال شوند. در واقع این کار از طریق انتقال (Shift) فرکانس سیگنال حامل در میان مجموعه‌ای از پیش‌تعیین شده از فرکانس‌ها انجام می‌گیرد، به صورتی که هر فرکانس، نشان‌دهنده عدد خاصی در داده دیجیتال است. به عنوان مثال، یک فرکانس می‌تواند نشان‌دهنده عدد یک باینری و فرکانس دیگری می‌تواند نشان‌دهنده عدد صفر باینری باشد. این تکنیک مدولاسیون، کلیدزنی انتقال فرکانسی (Frequency-Shift Keying) نام دارد و به اختصار FSK گفته می‌شود. FSK به صورت گسترده در مودم‌هایی مانند فکس مودم‌ها (Fax Modem) مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای ارسال کد موریس و در رادیو تله تایپ (Radioteletype) نیز می‌توان از FSK استفاده کرد.

مدولاسیون فرکانس عمدتاً برای انتشار رادیویی FM مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این نوع مدولاسیون همچنین در کاربردهایی مانند اندازه‌گیری از راه دور (Telemetry)، رادار، کاوش زمین لرزه، پایش وضعیت سلامت نوزادان تازه به دنیا آمده برای جلوگیری از تشنج (با استفاده از سیگنال‌های EEG)، سیستم‌های رادیویی دو طرفه، آنالیز موسیقی، سیستم ضبط نوار مغناطیسی و برخی سیستم‌های انتقال ویدیویی استفاده می‌شود.

در ارتباطات رادیویی، یکی از مزیت‌های اصلی مدولاسیون فرکانسی این است که دارای نسبت سیگنال به نویز بسیار بزرگی است و بنابراین قادر خواهد بود تداخلات فرکانس رادیویی را بهتر از یک سیگنال مدولاسیون دامنه با توان برابر رد (Reject) کند. به همین دلیل است که امروزه اکثراً سیگنال موسیقی را با استفاده از مدولاسیون فرکانس منتشر می‌کنند.

مدولاسیون فرکانس و مدولاسیون فاز دو روش اصلی و مکمل در گروه مدولاسیون زاویه (Angle Modulation) هستند. مدولاسیون فاز معمولاً به عنوان یک گام میانی برای رسیدن به مدولاسیون

فرکانس محسوب می‌شود. این روش بر خلاف مدولاسیون دامنه عمل می‌کند. در تکنیک مدولاسیون دامنه، دامنه سیگنال حامل تغییر می‌کند اما فرکانس و فاز آن ثابت باقی می‌ماند.

در مدولاسیون فرکانس آنالوگ، انحراف فرکانسی (Frequency Deviation) لحظه‌ای عبارت است از اختلاف بین فرکانس سیگنال حامل و فرکانس مرکزی آن و این مقدار متناسب با سیگنال مدولاسیون است. انتشار رادیویی یک سیگنال صوتی (حاوی گفتار یا موزیک) با مدولاسیون فرکانس، نمونه‌ای از مدولاسیون FM آنالوگ است.

ریاضیات مدولاسیون فرکانس

سیگنال پیامی که قرار است منتقل شوند را $x(m(t))$ فرض کرده و سیگنال حامل سینوسی را با معادله زیر نشان می‌دهیم:

$$x_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

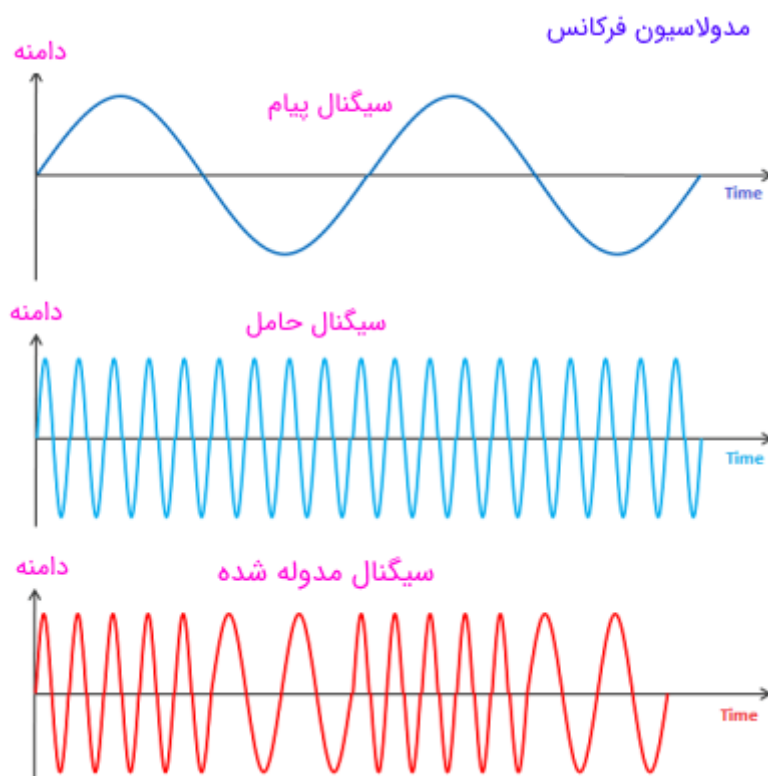
در فرمول بالا، f_c فرکانس پایه سیگنال حامل و A_c دامنه سیگنال حامل است. مدولاسیون فرکانس، سیگنال حامل را با سیگنال پیام باند پایه (Baseband Data Signal) ترکیب می‌کند و در نهایت سیگنال مدولاسیون به صورت زیر به دست می‌آید که قابل انتقال تا مسافت‌های طولانی است.

$$y(t) = A_c \cos(2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau)$$

$$= A_c \cos(2\pi \int_0^t [f_c + f \Delta x_m(\tau)] d\tau)$$

$$= A_c \cos(2\pi f_c t + 2\pi f \Delta \int_0^t x_m(\tau) d\tau)$$

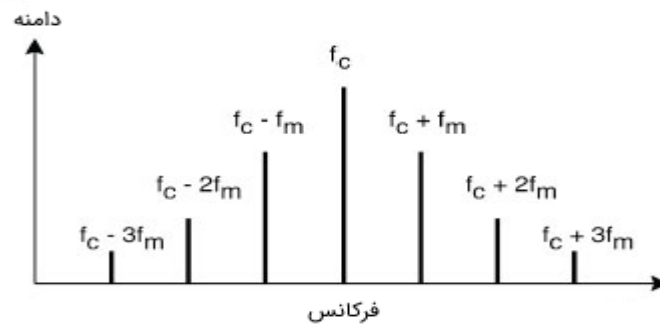
در فرمول بالا، $f \Delta = k_f A_m$ است که در آن k_f حساسیت مدولاتور فرکانس و A_m دامنه سیگنال پیام یا سیگنال باند پایه را نشان می‌دهد. در این معادله $f \Delta$ فرکانس لحظه‌ای اسیلاتور و $f \Delta$ انحراف فرکانسی است. انحراف فرکانسی نشان‌دهنده بیشینه انتقال نسبت به f_c در یک جهت است، با این فرض که $x_m(t)$ در بازه ± 1 محدود باشد. نمایی از سیگنال پیام، سیگنال حامل و سیگنال مدوله شده توسط مدولاسیون فرکانس در تصویر زیر نشان داده شده‌اند.



شکل ۱

مدولاسیون فرکانس

به دلیل این که قسمت عمده انرژی سیگنال در $f_c \pm f_{\Delta}$ است، از طریق آنالیز فوریه می توان نشان داد که گستره وسیعی از فرکانس ها مورد نیاز است تا بتوان یک سیگنال FM را با دقت بالا نمایش داد. طیف فرکانسی متعلق به یک سیگنال FM واقعی، دارای المان هایی است که تا بی نهایت بسط داده شده اند، البته دامنه این المان ها به تدریج کاهش می یابند و از المان های مراتب بالا معمولا در مسائل طراحی عملی صرف نظر می شود. در تصویر زیر نمایی از طیف فرکانسی متعلق به یک سیگنال FM نشان داده شده است.



شکل ۲

طیف فرکانسی متعلق به یک سیگنال FM سیگنال باند پایه سینوسی از لحاظ ریاضی، سیگنال پیام باند پایه را می‌توان با موج پیوسته سینوسی تقریب زد که دارای فرکانس f_m باشد. این روش، مدولاسیون تک تن (Single-Tone Modulation) نیز نامیده می‌شود. انتگرال چنین سیستمی برابر است با:

$$\int x_m(\tau) d\tau = A_m \sin(2\pi f_m t) / 2\pi f_m$$

در این حالت، می‌توان معادله $y(t)$ به دست آمده در قسمت قبل را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$y(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + A_m f_\Delta \sin(2\pi f_m t) / f_m)$$

در این فرمول، دامنه A_m سیگنال سینوسی باند پایه، توسط انحراف f_Δ نمایش داده می‌شود. توزیع هارمونیک سیگنال حامل سینوسی که توسط چنین سیگنال باند پایه سینوسی مدوله شده باشد را می‌توان با استفاده از توابع بسل (Bessel Functions) نمایش داد. این امکان، پایه‌ای برای درک ریاضیات مدولاسیون فرکانس در حوزه فرکانس (Frequency Domain) را فراهم می‌آورد.

شاخص مدولاسیون فرکانس

همانند سایر سیستم‌های مدولاسیون، شاخص مدولاسیون (Modulation Index) در مدولاسیون فرکانس نشان می‌دهد که سیگنال مدوله شده تا چه مقدار حول سطح مدوله نشده خود تغییر کرده

است. شاخص مدولاسیون به تغییر در فرکانس سیگنال حامل وابسته است. در نتیجه می‌توان فرمول شاخص مدولاسیون فرکانس را به صورت زیر نوشت:

$$h = \Delta f / f_m = f \Delta |x_m(t)| / f_m$$

در این فرمول، f_m بزرگ‌ترین المان فرکانس حاضر در سیگنال پیام $x_m(t)$ و Δf پیک انحراف فرکانسی یا به عبارت دیگر، بیشینه انحراف فرکانس لحظه‌ای از فرکانس حامل در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین برای یک مدولاسیون سینوسی، شاخص مدولاسیون را می‌توان به صورت نسبت پیک انحراف فرکانسی موج حامل بر فرکانس سیگنال پیام سینوسی در نظر گرفت.

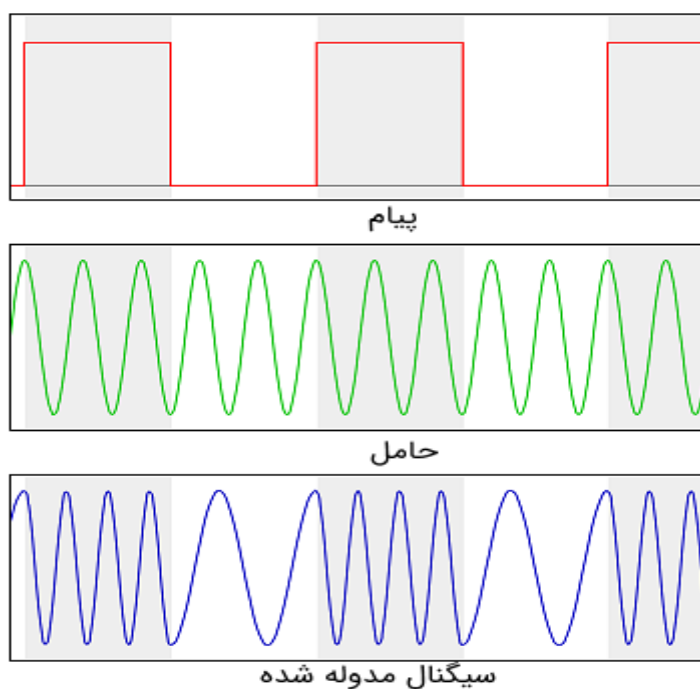
مدولاسیون باند باریک

اگر $h \ll 1$ باشد، آن‌گاه چنین مدولاسیونی را مدولاسیون باند باریک FM یا Narrowband FM می‌گویند. در این حالت پهنای باند مدولاسیون فرکانس تقریباً $2f_m$ خواهد بود. اکثراً شاخص مدولاسیون $h < 0.3$ را مدولاسیون باند باریک یا NFM محسوب کرده و سایر موارد را مدولاسیون فرکانس پهن باند (Wideband FM) یا WFM در نظر می‌گیرند.

در سیستم‌های مدولاسیون دیجیتال مانند کلیدزنی شیفت فرکانسی باینری (Binary Frequency Shift Keying) یا BFSK، یک سیگنال باینری موج حامل را مدوله می‌کنیم. در این سیستم‌ها شاخص مدولاسیون توسط فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$h = \Delta f / f_m = \Delta f / 1/2T_s = 2\Delta f * T_s$$

در این فرمول، T_s به صورت قراردادی نماد دوره تناوب و $f_m = 1/2T_s$ به عنوان بزرگ‌ترین فرکانس موج پیام باینری مورد استفاده قرار می‌گیرد، اگرچه شاید دقیق‌تر باشد که بگوییم $f_m = 1/2T_s$ بزرگ‌ترین پایه (Fundamental) شکل موج پیام باینری است. در مورد مدولاسیون دیجیتال، فرکانس حامل f_c هرگز منتقل نمی‌شود. در عوض یکی از دو فرکانس $f_c + \Delta f$ یا $f_c - \Delta f$ ارسال می‌شوند که به حالت باینری ۰ یا ۱ در سیگنال پیام بستگی دارد. نمایی از سیگنال‌ها در مدولاسیون دیجیتال کلیدزنی شیفت فرکانسی باینری در تصویر زیر دیده می‌شود.



شکل ۳

نمایی از سیگنال‌ها در مدولاسیون دیجیتال کلیدزنی شیفت فرکانسی باینری

مدولاسیون پهن باند

اگر $h \gg 1$ باشد، مدولاسیون فرکانس را پهن باند یا WFM می‌گویند. در این صورت پهنای باند تقریباً برابر با $2f\Delta$ در نظر گرفته می‌شود. اگرچه مدولاسیون پهن باند، پهنای باند بیشتری را اشغال می‌کند، اما می‌تواند نسبت سیگنال به نویز را بهبود ببخشد. به عنوان مثال، با دو برابر کردن مقدار Δf ، در حالی که f_m ثابت باشد، نسبت سیگنال به نویز به اندازه هشت برابر بهبود می‌یابد. در یک موج FM تک تن، اگر فرکانس مدولاسیون ثابت نگه داشته شود و شاخص مدولاسیون افزایش یابد، آنگاه پهنای باند سیگنال FM افزایش می‌یابد، اما فضای بین طیف همچنان ثابت باقی می‌ماند. در این حالت، شدت برخی از عناصر طیفی کاهش و برخی افزایش می‌یابند. اگر انحراف فرکانسی ثابت نگه داشته شود و فرکانس مدولاسیون افزایش داده شود، آنگاه فضای بین طیف افزایش می‌یابد.

اگر تغییر در فرکانس حامل مشابه با فرکانس پیام باشد، آن گاه مدولاسیون فرکانس را می توان جزو مدولاسیون باند باریک طبقه بندی کرد. همچنین اگر تغییر در فرکانس حامل بسیار بالاتر از فرکانس سیگنال پیام (شاخص مدولاسیون > 1) باشد، مدولاسیون را می توان به عنوان پهن باند طبقه بندی کرد. مدولاسیون باند باریک، به عنوان مثال در ارتباطات رادیویی دو طرفه کاربرد دارد که در این ارتباطات سیگنال حامل فقط اجازه دارد در حدود ۲٫۵ کیلو هرتز بالا و پایین فرکانس مرکزی منحرف شود. بنابراین سیگنال های حرف زدن نمی توانند پهنای باند بیشتر از ۳٫۵ کیلو هرتز داشته باشند. مدولاسیون فرکانس پهن باند برای انتشار FM مورد استفاده قرار می گیرد که در آن موسیقی و کلام با انحراف بالاتر از ۷۵ کیلو هرتز از فرکانس مرکزی منتقل می شوند و سیگنال صوت را پهنای باند بیشتر از ۲۰ کیلو هرتز و زیر حامل بالاتر از ۹۲ کیلو هرتز حمل می کند.

توابع بسل

برای مواردی که یک سیگنال حامل توسط یک موج تکی سینوسی مدوله شود، طیف فرکانسی حاصل را می توان با استفاده از توابع بسل نوع اول به عنوان یک تابع از عدد باند جانبی و شاخص مدولاسیون محاسبه کرد. دامنه سیگنال های حامل و باند جانبی برای چند مقدار شاخص مدولاسیون متفاوت در سیگنال های FM به عنوان مثال در جدول زیر محاسبه شده اند. برای مقادیر خاصی از شاخص مدولاسیون، دامنه موج حامل صفر می شود و تمام توان سیگنال در باندهای جانبی قرار می گیرد.

اندیس مدولاسیون	دامنه باند جانبی										
	حامل	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.00	1.00										
0.25	0.98	0.12									
0.5	0.94	0.24	0.03								
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02							
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01						
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03						
2.41	0.00	0.52	0.43	0.20	0.06	0.02					
2.5	-0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	0.01				
3.0	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01				
4.0	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02			
5.0	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02		
5.53	0.00	-0.34	-0.13	0.25	0.40	0.32	0.19	0.09	0.03	0.01	
6.0	0.15	-0.28	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	

چون باندهای جانبی در هر دو طرف از سیگنال حامل هستند، دو بار حساب می‌شوند و سپس برای یافتن پهنای باند در فرکانس مدولاسیون ضرب می‌شوند. به عنوان مثال، انحراف ۳ کیلو هرتز که توسط موج صوتی ۲/۲ کیلو هرتز مدوله شود، شاخص مدولاسیون در حدود ۱/۳۶ را تولید می‌کند. فرض کنید که خود را به تولید باندهای جانبی محدود کنیم که دارای دامنه نسبی حداقل ۰/۰۱ باشند. بنابراین، با استفاده از جدول بالا می‌توان نشان داد که این شاخص مدولاسیون سه باند جانبی را تولید می‌کند. این سه باند جانبی، پس از دو برابر شدن به ما پهنای باند $6 \times 2.2\text{KHZ} = 13.2\text{KHZ}$ می‌دهند.

قاعده کارسون

در سیستم‌های مخابراتی با استفاده از قاعده پهنای باند کارلسون (Carson Bandwidth Rule)، پهنای باند تقریبی مورد نیاز در یک سیستم مخابراتی را تعریف می‌کنند. این پهنای باند متعلق به سیگنال حاملی است که توسط طیف گسترده یا پیوسته فرکانسی، به جای تک فرکانس، مورد مدولاسیون

فرکانس قرار گرفته باشد. این قاعده به خوبی بر روی سیگنال‌های پیام حاوی ناپیوستگی مانند موج مربعی، قابل اعمال نیست.

بر اساس قاعده ساده کارسون (Carson's Rule)، حدوداً تمام (۹۸ درصد) توان سیگنالی که مدولاسیون فرکانس شده باشد، در پهنای باند BT قرار دارد. این پهنای باند را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$B_T = 2(\Delta f + f_m) = 2f_m(\beta + 1)$$

که در این فرمول، Δf ، همان‌طور که در بالا اشاره شد، برابر با پیک انحراف فرکانس لحظه‌ای $f(t)$ از فرکانس مرکزی حامل f_c و β برابر با شاخص مدولاسیون (نسبت انحراف فرکانس به بالاترین فرکانس در سیگنال پیام) و f_m بالاترین فرکانس در سیگنال پیام است. البته به این نکته توجه کنید که فقط در مورد سیگنال‌های سینوسی می‌توان از قاعده کارلسون استفاده کرد.

$$B_T = 2(\Delta f + W) = 2W(D + 1)$$

در فرمول بالا، W برابر با بزرگترین فرکانس در سیگنال پیامی است که دارای طبیعت غیر سینوسی باشد و D نسبت انحراف در نظر گرفته می‌شود که برابر با نسبت انحراف فرکانسی به بزرگترین فرکانس سیگنال پیام غیر سینوسی است.

کاهش نویز

در قسمت‌های قبل هم به این موضوع اشاره شد که در مدولاسیون فرکانس یا FM در مقایسه با مدولاسیون دامنه یا AM، نسبت سیگنال به نویز بهبود یافته است. نسبت به یک مدولاسیون دامنه بهینه، می‌توان گفت که مدولاسیون فرکانس به ازای مقادیر زیر یک سطح سیگنال خاص که سطح آستانه نام دارد، دارای نسبت سیگنال به نویز ضعیف‌تری است. اما به ازای مقادیر بالاتر از یک سطح خاص (که آستانه بهبود کامل (Full Improvement) یا آستانه آرامش کامل (Full Quieting) نام دارد)، نسبت سیگنال به نویز یا SNR سیگنال مدولاسیون فرکانس در مقایسه با مدولاسیون دامنه، بسیار بهتر است. در واقع بهبود نسبت سیگنال به نویز یا SNR، به انحراف و سطح مدولاسیون بستگی دارد. در تصویر آزمایش انجام شده در سال ۱۹۴۰ در آمریکا را مشاهده می‌کنید که

در آن از یک منبع توان بالا به عنوان نویز در پشت یک رادیو استفاده شده است. رادیو مجهز به گیرنده FM و AM است. در گیرنده AM مقادیر تصادفی به عنوان سیگنال پیام دریافت شده بود در حالی که در گیرنده FM سیگنال موسیقی با وضوح بالا دریافت شد. این آزمایش تاییدی بر رد نویز بالای مدولاسیون FM است.

برای کانال‌های مخابرات صوتی معمولی، میزان بهبود در حدود ۵ تا ۱۵ دسی بل است. پخش برنامه‌ها با مدولاسیون فرکانس (FM Broadcasting) و یک انحراف گسترده‌تر، می‌توان SNR را حتی به مقدار بیشتری بهبود داد. تکنیک‌های دیگر، مانند فرکانس‌های صوتی بالاتر یا پیش متمرکز (Pre-Emphasis)، معمولاً برای بهبود SNR کلی در مدارات مدولاسیون فرکانسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. چون سیگنال‌های مدولاسیون فرکانس دارای دامنه ثابتی هستند، گیرنده‌های مدولاسیون فرکانس معمولاً قسمت‌های محدودکننده (Limiter) دارند تا نویزهای AM را حذف کنند و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز را بهبود دهند.

کاربردها

مدولاسیون فرکانس، در فرکانس‌های میانی توسط سیستم‌های ضبط کننده کاست ویدیویی یا VCR آنالوگ، برای ضبط قسمت سیاه و سفید سیگنال‌های ویدیویی مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً المان رنگ در این سیگنال‌ها توسط سیگنال مدولاسیون دامنه استاندارد ضبط می‌شود که از سیگنال FM با فرکانس بالاتر به عنوان بایاس استفاده می‌کند. FM تنها روش قابل قبول برای ضبط قسمت سیاه و سفید در سیگنال ویدیویی بر روی نوار مغناطیسی بدون اعوجاج است. سیگنال‌های ویدیویی گستره وسیعی از فرکانس‌ها، از چند هرتز تا چندین مگا هرتز را شامل می‌شوند و به همین دلیل برای کار با اکولایزرها (Equalizers) بسیار مناسب هستند. مدولاسیون FM همچنین قادر است نوار را در سطح اشباع نگه دارد و مانند یک سیستم کاهش نویز عمل کند. به صورت خلاصه کاربردهای مدولاسیون فرکانس را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

انتشار FM

رادیو

سیستم‌های ضبط نوار مغناطیسی

اندازه‌گیری از راه دور یا تله متری

سیستم‌های رادیویی دو طرفه

ترکیب (Synthesis) موسیقی

مزایای و معایب مدولاسیون فرکانس

تمام توان منتقل شده در مدولاسیون فرکانس مفید است، در حالی که در مدولاسیون دامنه قسمت عمده توان در سیگنال حامل قرار دارد که غیر قبال استفاده است.

در مدولاسیون فرکانس تداخل کانال‌های مجاور اتفاق نمی‌افتد.

نسبت سیگنال به نویز در مدولاسیون فرکانس بالاتر است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که نویز کمتری در سیگنال مدوله‌شده وجود دارد.

عیب مدولاسیون فرکانس در این است که به پهنای باند بیشتری نسبت به مدولاسیون دامنه نیاز دارد.

رادیو دیجیتال FM

این رادیو در مورد مدولاسیون FM اجرا شده است که با تغییر فرکانس سیگنال دریافت شده را به فرکانس مورد نظر شیفت می‌دهد و آن را آشکار سازی می‌کند و سپس آن را به محدوده فرکانس شنوایی انسان در محدوده ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز فیلتر می‌کند و آن را به صورت فایل wav ذخیره می‌کند:

شرط درست کار کردن دستور مدولاسیون FM این است که نرخ نمونه برداری حداقل دو برابر فرکانسی سیستم حامل باشد که این شرط برای دو شبکه رادیویی آوا و اقتصاد برقرار است و برای شبکه گفتگو و فرهنگ به صورت دستی آن را اعمال می کنیم و نتایج را با پخش فایل صوتی ذخیره شده در هر مرحله چک می کنیم:

دستورات input، fopen، fscanf، audiowrite، fmod، bandpass به ترتیب دستور ورود داده از کاربر، باز نمودن فایل txt، ذخیره نمودن فایل رادیویی ذخیره شده در محیط متلب، ایجاد فایل صوتی، ایجاد مدولاسیون رادیو دیجیتال FM و فیلتر میانگذر در این کد استفاده شده اند و این کد در محیط Matlab R2022b نوشته و اجرا شده است:

خروجی این کد در چهار ایستگاه رادیویی ده ثانیه جملات مجری رادیویی می باشد که در فایل های صوتی خروجی قابل شنیدن می باشند.

```
clc
clear all

disp('I=1 (FM_AVA=96000), I=2 (FM_EQTESAD=144000), I=3 (FM_GOFTOGO=288000), I=4 (FM_FARHANG=240000)');
I=input('Enter number of frequency : \n');

FM_AVA=96000;
FM_EQTESAD=144000;
FM_GOFTOGO=288000;
FM_FARHANG=240000;
Fs=480000;
freqdev=50;

fileID = fopen('input.txt','r');
formatSpec = '%f';
y = fscanf(fileID,formatSpec);
fclose(fileID);
audiowrite('m.wav',y,Fs);

if I==1

FM_freq=FM_AVA;

ynew = fmod(y,FM_freq,Fs,freqdev);
% ynew=y(1:192000);
audiowrite('m_Ava.wav',ynew,Fs);

y1f=fft(ynew);
```

١٦

```
y2 = bandpass(ynew,[20 20000],Fs);
audiowrite('m_Ava_f.wav',y2,Fs);

% player = audioplayer(y2, Fs);
% play(player);

disp('I=1 (FM_AVA=96000), I=2 (FM_EQTESAD=144000), I=3 (FM_GOFTOGO=288000), I=4
(FM_FARHANG=240000)');
I=input('Enter number of frequency : \n');
end

if I==2

FM_freq=FM_EQTESAD;

ynew = fmod(y,FM_freq,Fs,freqdev);
% ynew=y(1:192000);
audiowrite('m_Eqtasad.wav',ynew,Fs);

y1f=fft(ynew);
y2 = bandpass(ynew,[20 20000],Fs);
audiowrite('m_Eqtasad_f.wav',y2,Fs);

disp('I=1 (FM_AVA=96000), I=2 (FM_EQTESAD=144000), I=3 (FM_GOFTOGO=288000), I=4
(FM_FARHANG=240000)');
I=input('Enter number of frequency : \n');
end

if I==3

FM_freq=FM_GOFTOGO;

ynew = fmod(y,FM_freq,2*FM_freq,freqdev);
% ynew=y(1:192000);
audiowrite('m_Goftogo.wav',ynew,Fs);

y1f=fft(ynew);
y2 = bandpass(ynew,[20 20000],Fs);
audiowrite('m_Goftogo_f.wav',y2,Fs);

disp('I=1 (FM_AVA=96000), I=2 (FM_EQTESAD=144000), I=3 (FM_GOFTOGO=288000), I=4
(FM_FARHANG=240000)');
I=input('Enter number of frequency : \n');
end

if I==4
```



```
FM_freq=FM_FARHANG;

ynew = fmod(y,FM_freq,2*FM_freq,freqdev);
% ynew=y(1:192000);
audiowrite('m_Farhang.wav',ynew,Fs);


y1f=fft(ynew);
y2 = bandpass(ynew,[20 20000],Fs);
audiowrite('m_Farhang_f.wav',y2,Fs);

end
```