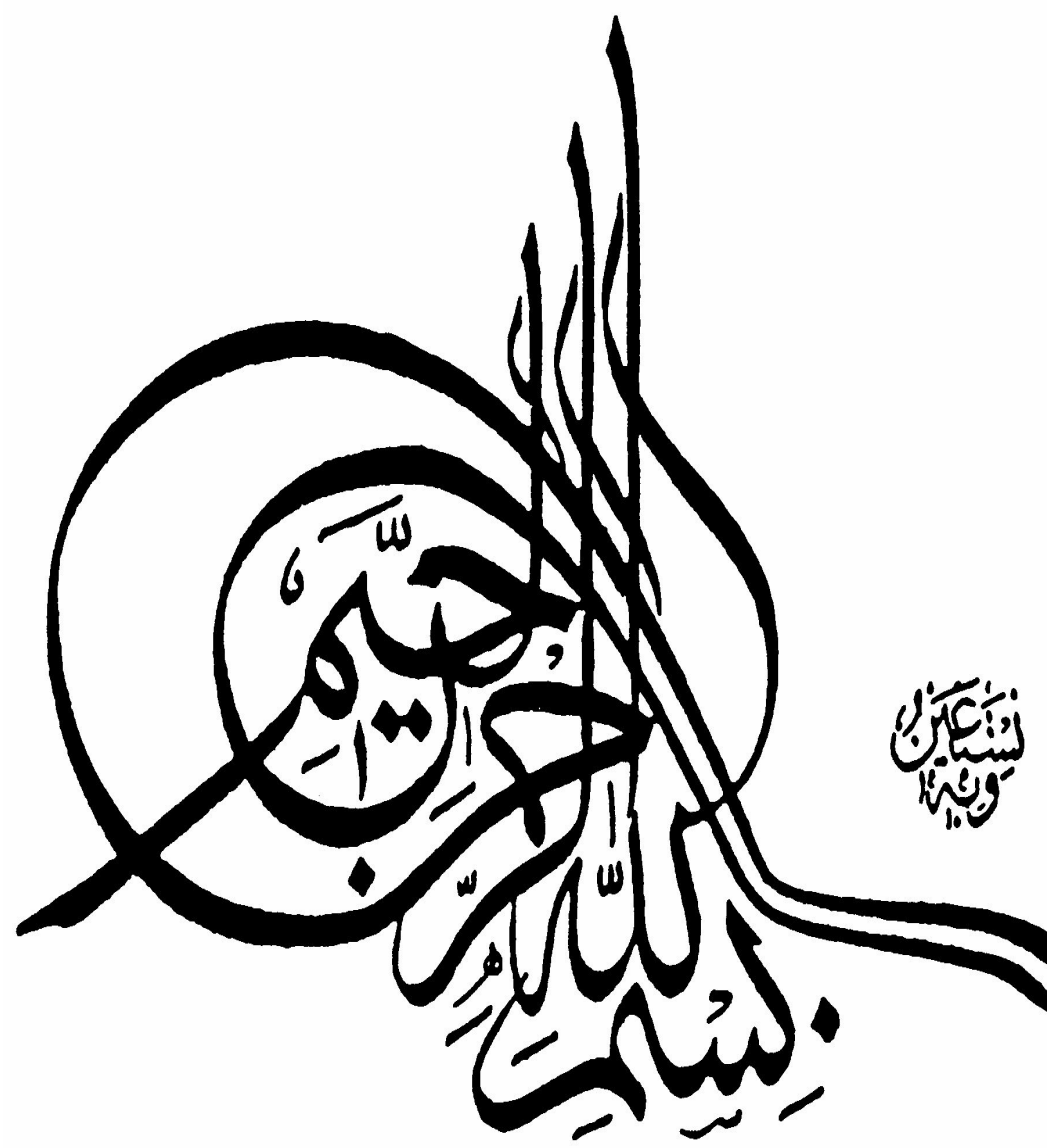


0

چکیده

در این تحقیق ابتدا سیستم‌های MIMO-OFDM را بیان می‌کنیم. سپس به بیان تخمین کانال می‌پردازیم و تخمین به روش حداقل مربعات را بیان می‌کنیم. تخمین کانال یکی از مسایل مهم در بسیاری از سیستم‌های مخابرات بی‌سیم است. روش بسیار متداول تخمین کانال، استفاده از پایلوت است. پایلوت‌ها اطلاعات از قبل تعیین شده‌ای هستند که تعداد آن‌ها، دامنه و محل استقرار آن‌ها برای گیرنده معلوم است. در این پایان‌نامه، ما به معرفی پایلوت‌های بهینه و طراحی آن می‌پردازیم و معیار بهینگی پایلوت‌ها را بیان می‌کنیم. روش‌هایی که تا کنون برای به‌دست آوردن پایلوت بهینه انجام شده است، مطالعه می‌کنیم. سپس این روش‌ها را با هم مقایسه می‌کنیم و سودمندی‌های هر یک را ذکر می‌کنیم، این روش‌های مختلف پایلوت را روی کانال‌های مختلف با شرایط متفاوت بررسی می‌کنیم. در این پایان‌نامه هم‌چنین، روشی جدید در طراحی پایلوت کانال‌های متغیر با زمان ارائه می‌شود و در حضور باند محافظ، پایلوتی طراحی می‌کنیم که خطا را حداقل می‌کند. این طراحی در مقایسه با کارهای قبلی از نظر کاهش خطا دارای کارآیی بالاتری است.

کلمات کلیدی: پایلوت، تخمین کانال، سیستم MIMO-OFDM، باند محافظ، طراحی پایلوت بهینه

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ---------- ۱

فصل دوم: سیستم‌های MIMO-OFDM و طراحی پایلوت بهینه ---------- ۵

۲-۱مفهوم کانال چندورودی - چندخروجی --- ---------- ۶

۲-2 مفهوم سیستم OFDM ---------- ۱۰

۲-۳ سیستم‌های MIMO-OFDM ---------- ۱۵

۲-۴ مفهوم تخمین کانال ---------- ۱۷

۲-۵ طراحی پایلوت بهینه ---------- ۲۴

۲-۵-۱ مدل سیگنال و شرایط بهینه ---------- ۲۴

۲-۵-۲ طراحی سیگنال‌های آموزشی بهینه روی یک سمبل MIMO-OFDM---------- 26

۲-۵-۳ شرایط بهینه در حوزه زیرحامل‌ها ---------- ۲۷

۲-۵-۴ طراحی سیگنال‌های آموزشی برای $N_{Tx}L_0 = K$ ---------- 28

۲-۵-۵ ساختارهای دیگری از سیگنال‌های آموزشی ---------- ۳۲

۲-۵-۶ طراحی سیگنال‌های آموزشی برای $N_{Tx}L_0 < K$ ---------- ۳۳

۲-۵-۷ ساختارهای سیگنال‌های آموزشی ترکیبی ---------- ۳۶

۲-۵-۸ طراحی سیگنال‌های آموزشی بهینه روی چندین سمبل OFDM ---------- ۳۶

۲-۵-۹ طراحی سیگنال‌های آموزشی روی Q سمبل ---------- ۳۹

۲-۵-۱۰ساختارهای ترکیبی سیگنال‌های آموزشی ---------- ۴۱

۲-۵-۱۱ تحقیقات صورت گرفته ---------- ۴۳
فصل سوم: طراحی پایلوت در شرایط مختلف کانال ---------- ۵۲
۳-۱ طراحی پایلوت در کانال ثابت با زمان با محوشدگی رایلی ---------- ۵۳
۳-۱-۱ مدل سیستم MIMO-OFDM ---------- ۵۳
۳-۱-۲ طراحی پایلوت بهینه ---------- ۵۶
۳-۱-۳ مقایسه طراحی‌های مختلف با توجه به شرایط کانال ---------- ۵۹
۳-۲ طراحی پایلوت در کانال متغیر با زمان ---------- ۶۱
۳-۲-۱ مدل سیستم ---------- ۶۱
۳-۲-۲ مدل سیستم SISO OFDM ---------- ۶۲
۳-۲-۳ تخمین‌گر حداقل مربعات ---------- ۶۴
۳-۲-۴ معیار طراحی پایلوت بهینه در کانال متغیر با زمان ---------- ۶۴
۳-۲-۵ مدل سیگنال یک سیستم MIMO-OFDM ---------- ۶۸
۳-۲-۶ معیار طراحی پایلوت‌های بهینه در سیستم MIMO-OFDM ---------- ۶۸
۳-۲-۷ طراحی پایلوت به روش FDM ---------- ۷۰
۳-۲-۸ طراحی سیگنال‌های آموزشی برای $N_t L_0 = N$ ---------- ۷۱
۳-۳ طراحی پایلوت در حضور باند محافظ ---------- ۷۳
فصل چهارم: شبیه‌سازی ---------- ۷۹
۴-۱ شبیه‌سازی در کانال دارای محوشدگی رایلی و ثابت با زمان ---------- ۸۰
۴-۲ شبیه‌سازی درکانال متغیر با زمان و مدل BEM ---------- ۸۳
۴-۳ شبیه‌سازی در کانال دارای محوشدگی رایلی در حضور باند محافظ ---------- ۸۴
فصل پنجم: نتایج ---------- ۸۷

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی ---------- ۹۱
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ---------- ۹۴
مراجع ---------- ۹۷

فهرست مخفف‌ها

ADSL	Asymmetric Digital Subcarrier Line
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BEM	Basis Expansion Model
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDM	Code Division Multiplexed
CDM(F)	Code Division Multiplexed (Frequncy)
CDM(T)	Code Division Multiplexed (Time)
CIR	Channel Impulse Response
CP	Cyclic Prefix
CRLB	Cramer Rao Lower Bound
DFT	Discrete Fourier Transform
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial
FDM	Frequency Division Multiplexed
FIR	Finite Impulse Response
ICI	Inter-Channel Interference
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
i.i.d	Independent Identical Distribution
ISI	Inter-Symbol Interferenc
LAN	Local Area Network
LPF	Low Pass Filter

LS	Least Square
LSE	Least Square Error
MIMO	Multi Input Multi Output
ML	Maximum Likelihood
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MMSE	Minimum Mean Square Error
MMSEE	Minimum Mean Square Error Estimator
MSE	Mean Square Error
NMSE	Normalized Mean Square Error
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAR	Peak to average Ratio
PDF	Probability Density Function
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
SER	Symbol Error Rate
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SVD	Singular Value Decomposition
TDM	Time Division Multiplexed
TFDM	Time Frequency Division Multiplexed
TV	Time Varing
UWB	Ultera Wide Band
WGN	White Gaussian Noise
ZF	Zero Forcing

فصل اول

مقدمه

امروزه سیستم‌های MIMO-OFDM[1] بسیار مورد توجه هستند. سیستم MIMO ظرفیت کانال را افـزایش مـی‌دهـد و در یک محیط دارای محوشدگی، دایورسیتی به‌وجود می‌آورد. سیستم OFDM برای ارسال اطلاعات روی کانال‌های بی‌سـیم با پهنای باند زیاد، مناسب است زیرا در برابر محوشدگی چندمسیره مقاوم بوده و آن را به زیرکانـال‌هـایی بـا محوشـدگی تخت تبدیل می‌نماید. ترکیب OFDM با MIMO می‌تواند کارایی ارسال را بالا ببرد [1].

اطلاعات وضعیت کانال به روش‌های مختلفی به‌دست می‌آید. روش اول تخمین کانال به روش کـور[2] اسـت [2] و [3]. در روش کور برای آشکارسازی داده در گیرنده از خواص آماری کانال و خواص سـیگنال‌هـای ارسـالی اسـتفاده مـی‌شـود. روش دارای پیچیدگی بالایی است. روش دوم بر مبنای تکنیک پایلوت-داده است که در آن یک مجموعه سمبل آموزشـی که از قبل برای گیرنده شناخته شده است، با داده ارسال می‌شود [4]. روش سوم شامل تخمین کانـالی اسـت کـه هـم از اطلاعات داده و هم از اطلاعات پایلوت استفاده می‌کند و به آن تخمین نیمـه‌کـور مـی‌گوینـد [5]. در ایـن پـروژه از روش پایلوت-داده برای تخمین کانال استفاده می‌شود.

در [4-6] تخمین کانال برای سیستم‌های MIMO-OFDM بررسی شده اسـت. در [6] ازروش طراحـی پـایلوت بـرای تخمین کانال استفاده شده است. در [4] و [5] از کدهای فرکانسی فضا[3] در طراحی به‌کار گرفته شده اسـت. در [7] و [8] پایلوت‌های بهینه در یک سیستم OFDM، به‌گونه‌ای طراحی شده است که متوسـط مربعـات خطـا را حـداقل و ظرفیـت کانال را حداکثر می‌کنند. این روش در [9] برای سیستم‌های با چندین آنتن فرستنده و گیرنـده، بررسـی شـده اسـت. در [10] پایلوت بهینه در حضور باند محافظ طراحی شده است که در آن، اثر باند محافظ روی خطای تخمین کانـال بررسـی

[1] Multi Input Multi Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing
[2] Blind Method
[3] Space Frequency Codes

شده است. همچنین پایلوت‌ها به‌گونه‌ای قرار گرفته‌اند که حداکثر فاصله را با پایلوت‌های همسایه، به‌جز در باند محافظ داشته باشند.

در [11] پایلوت بهینه با استفاده از الگوریتم بهینگی که در [12] معرفی شده، به‌دست می‌آید. در این الگوریتم پایلوت‌ها در فواصل نامساوی از هم قرار گرفته‌اند. در [13] یک روش پایلوت بهینه برای سیستم‌های MIMO-OFDM تحت یک کانال متغیر با زمان معرفی شده است که در آن برای کانال از مدل بسط پایه[1] استفاده شده است. در [14] پایلوت‌های بهینه بر اساس معیار حداقل کردن متوسط مربعات خطا (MSE)[2] در یک کانال MIMO-OFDM دسته‌بندی شده است و به این نتیجه می‌رسد که برای یک کانال فرکانس انتخابی تمامی گروه‌های پایلوت دارای عملکرد یکسانی هستند.

پایلوت‌ها اطلاعات از قبل تعیین‌شده‌ای هستند که تعداد آن‌ها، دامنه و محل استقرار آن‌ها برای گیرنده معلوم است. مکان بهینه و اختصاص انرژی به پایلوت‌ها برای سیستم‌های OFDM در [15] مطالعه شده است، که در آن کانال دارای بلوک‌های محوشدگی به صورت فرکانس انتخابی است. طراحی مکان پایلوت‌ها با فرض اینکه تمام سمبل‌ها یا پایلوت‌ها هم‌انرژی هستند به‌گونه‌ای است که باند پایینی ظرفیت را حداکثر می‌کند. برای سیستم‌های OFDM، مکان بهینه پایلوت‌ها هنگامی است که پایلوت‌ها به‌طور مساوی از هم قرار بگیرند. در [16] طراحی پایلوت‌های بهینه و مکان سمبل‌های بهینه برای تخمین کانال با محوشدگی فرکانس انتخابی در سیستم‌های تک‌ورودی- تک‌خروجی (SISO)[3]، به منظور حداقل‌کردن باند Cramer-Rao انجام شده است. همین مسأله در [17] با حداکثر کردن باند پایینی ظرفیت متوسط بیان‌شده است. در [18] طراحی پایلوت بهینه برای تخمین کانال با محوشدگی فرکانس انتخابی تحلیل شده، که بر مبنای حداقل کردن متوسط مربعات خطا (MSE) است. به‌طورکلی اگر بتوان پایلوت‌های بهینه طراحی کرد، کانال بهتر تخمین زده می‌شود و در نتیجه در آشکارسازی داده در گیرنده خطای کمتری به‌دست می‌آید. در این تحقیق برای تخمین کانال از روش حداقل مربعات (LS)[4] استفاده می‌شود، زیرا در عمل پیاده‌سازی سیستم به روش LS دارای

[1] Basis Expansion Model
[2] Mean Square Error
[3] Sinlge Input Single Output
[4] Least Square

پیچیدگی کمتری نسبت به روش‌هایی مثل آشکارسازی با بیشترین احتمال (ML)[1] و آشکارسازی با حداقل کردن متوسط مربعات خطا (MMSE)[2] است.

در ادامه، در فصل دوم ابتدا به معرفی کانال‌های چندورودی - چندخروجی MIMO پرداخته می‌شود و مفهوم کانال چندورودی- چندخروجی مطالعه می‌شود. در قسمت دوم سیستم‌های OFDM معرفی می‌شود و مفهوم ارسال چندحاملی بیان می‌شود. OFDM به عنوان تسهیم تقسیم فرکانس‌های عمود بر هم تعریف می‌شود. در بخش سوم، سیستم‌های MIMO-OFDM معرفی می‌شود. در قسمت چهارم تخمین کانال مورد بررسی قرار می‌گیرد و تخمین به روش حداقل مربعات LS و تخمین خطی LS بیان می‌شود. در قسمت پنجم مدل کانال و طراحی پایلوت‌های بهینه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ابتدا پایلوت بهینه برای یک سمبل OFDM به‌دست می‌آید. سپس این نتایج به Q سمبل تعمیم داده می‌شود. در این بخش تحقیقات انجام شده بر روی طراحی پایلوت در کانال‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل سوم ابتدا روش‌های مختلف پایلوت در کانال‌های مختلف بررسی می‌شود. در این بخش گروه‌های پایلوت را در شرایط مختلف کانال قرار داده و اثر هر یک، روی کانال مورد نظر بررسی می‌شود و به این نتیجه می‌رسیم که هر گروه پایلوت برای شرایط خاصی از کانال مناسب است. در قسمت دوم طراحی پایلوت در کانال‌های متغیر با زمان معرفی می‌شود. در این بخش از اطلاعات فصل سوم کمک گرفته می‌شود و در کانال‌های متغیر با زمان، پایلوت به شیوه‌ای کاملاً جدید معرفی می‌شود. در این قسمت از طراحی پایلوت به روش تقسیم فرکانسی استفاده می‌شود. در بخش سوم طراحی پایلوت در حضور باند محافظ بررسی شده و شیوه جدیدی از طراحی پایلوت ارائه می‌شود، به‌گونه‌ای که خطا را حداقل می‌کند و در مقایسه با کارهای قبلی دارای کارایی بالاتری است.

در فصل چهارم نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود و در نهایت در فصل پنجم تحقیقات انجام شده مورد ارزیابی قرار گرفته و نتیجه‌گیری می‌شوند.

---

[1] Maximum Likelihood
[2] Minimum Mean Square Error

فصل دوم

سیستم‌های MIMO-OFDM

و طراحی پایلوت بهینه

در این فصل، ابتدا کانال‌های چندورودی – چندخروجی مورد بحث قرار می‌گیرند. در بخش دوم به معرفی سیستم‌های OFDM پرداخته می‌شود و مفهوم ارسال چندحاملی تشریح می‌شود. OFDM به عنوان تسهیم تقسیم فرکانس‌های عمود بر هم تعریف می‌شود. در بخش سوم، سیستم‌های MIMO-OFDM مورد مطالعه قرا می‌گیرد. دربخش چهارم تخمین کانال سیستم‌های MIMO-OFDM مورد بررسی قرار می‌گیرد و تخمین به روش حداقل مربعات LS و تخمین خطی LS بیان می‌شود. در بخش پنجم مدل کانال، شرط بهینگی و طراحی پایلوت‌های بهینه مطالعه می‌شود. ابتدا پایلوت بهینه روی یک سمبل OFDM شرح داده می‌شود. سپس این نتایج به Q سمبل تعمیم داده می‌شود. هم‌چنین در بخش پنجم، تحقیقات انجام شده بر روی طراحی پایلوت در کانال‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱ مفهوم کانال چندورودی- چندخروجی

مدل کانال ثابت با زمان به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$y = Hx + w \qquad (۱-۲)$$

به‌طوری‌که $x \in C^{n_t}$ [۱] ، $y \in C^{n_r}$ و $w \sim \mathrm{CN}(0, \mathrm{N}_0 I)$ [۲] به‌ترتیب نشان‌دهنده بردار سیگنال ارسالی، بردار سیگنال دریافتی و بردار نویز گوسی سفید در یک سمبل زمانی است (اندیس زمان حذف شده است). ماتریس کانال $H \in C^{n_t \times n_r}$

[1] C نشان دهنده اعداد مختلط است.

[2] نشان‌دهنده بردار تصادفی گوسی مختلط است

معین است و برای همه زمان‌ها (در گیرنده و فرستنده) ثابت فرض می‌شود. h_{ij} بهره کانال از آنتن فرستنده jام به آنتن گیرنده iام است. کل توان ارسالی سیگنال‌ها P است [18] .

این کانال، یک کانال گوسی برداری است. ظرفیت می‌تواند با تجزیه کانال برداری به یک مجموعه موازی مستقل گوسی، به‌دست آید. از جبرخطی می‌دانیم که هر تبدیل خطی می‌تواند به‌صورت عملیات چرخشی و عملیات مقیاس‌بندی نشان داده شود. ماتریس H می‌تواند به صورت تجزیه مقدار منفرد (SVD)[1] نوشته شود :

$$H = U\Lambda V^* \qquad (۲-۲)$$

به‌طوری‌که $U \in C^{n_r \times n_r}$ و $V \in C^{n_t \times n_t}$ ماتریس‌های یکانی[2] هستند. $\Lambda \in C^{n_r \times n_t}$ یک ماتریس مستطیلی است که عناصر قطرش اعداد حقیقی نامنفی هستند و بقیه عناصر ماتریس، صفر[3] است. عناصر قطر $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq ... \geq \lambda_{n_{\min}}$ هستند به‌طوری‌که λ_iها مقادیر منفرد و $n_{\min} = \min(n_t, n_r)$ است. هم‌چنین به‌دست می‌آید:

$$HH^* = U\Lambda\Lambda^t U^* \qquad (۳-۲)$$

بنابراین مجذور مقادیر منفرد، یعنی λ_i^2ها، مقادیر ویژه ماتریس HH^* و H^*H هستند. می‌دانیم به تعداد $n_{\min}$، مقدار منفرد وجود دارد. حال می‌توان SVD را به‌صورت زیر نوشت :

$$H = \sum_{i=1}^{n_{\min}} \lambda_i u_i v_i^* \qquad (۴-۲)$$

رتبه ماتریس H دقیقاً برابر با تعداد مقادیر منفرد غیرصفر است.

با تعریف:

$$\tilde{x} = V^* x \qquad (۵-۲)$$

$$\tilde{y} = U^* y \qquad (۶-۲)$$

$$\tilde{w} = U^* w \qquad (۷-۲)$$

---

[1] Singular Value Decomposition

[2] یادآوری می‌شود که U یک ماتریس یکانی است اگر : $U^*U = UU^* = I$.

[3] این ماتریس قطری نامیده می‌شود، حتی اگر مربعی نباشد.

می‌توان کانال (۲-۱) را دوباره به‌صورت زیر نوشت:

$$\tilde{y} = \Lambda\tilde{x} + \tilde{w} \qquad (۸-۲)$$

به‌طوری‌که $\tilde{w} \sim \mathrm{CN}(0, \mathrm{N}_0 I)$ دارای همان توزیع w است. هم‌چنین $\|\tilde{x}\|^2 = \|x\|^2$ است. بنابراین با این تبدیل، انرژی کل ثابت می‌ماند. یک نمایش معادل برای یک کانال گوسی موازی به صورت زیر است:

$$\tilde{y}_i = \lambda_i \tilde{x}_i + \tilde{w}_i \qquad i = 1,2,...,n_{\min} \qquad (۹-۲)$$

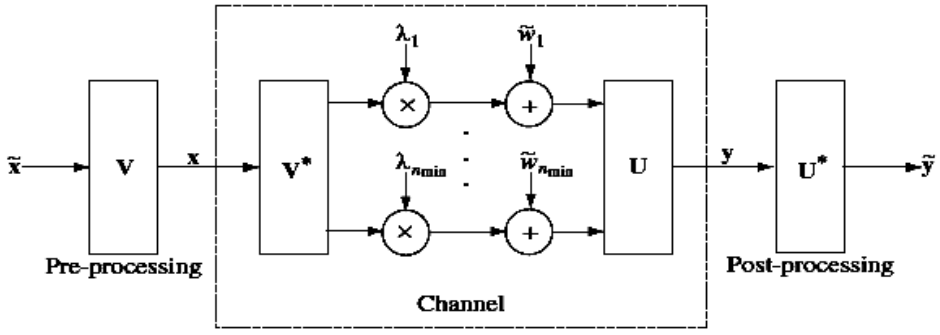
که در شکل ۲-۱ به‌طور خلاصه آورده شده است.

SVD می‌تواند به عنوان تبدیل مختصات تعبیر شود. SVD می‌گوید اگر ورودی بر حسب یک سیستم مختصات با V ستون و خروجی با U ستون بیان شود، آنگاه رابطه ورودی- خروجی خیلی ساده است. معادله (۲-۸) نمایشی از کانال اولیه (۲-۱) است، به‌طوری‌که ورودی- خروجی بر حسب مختصات جدید خود بیان می‌شوند. بنابراین ظرفیت از رابطه آشنای زیر به‌دست می‌آید:

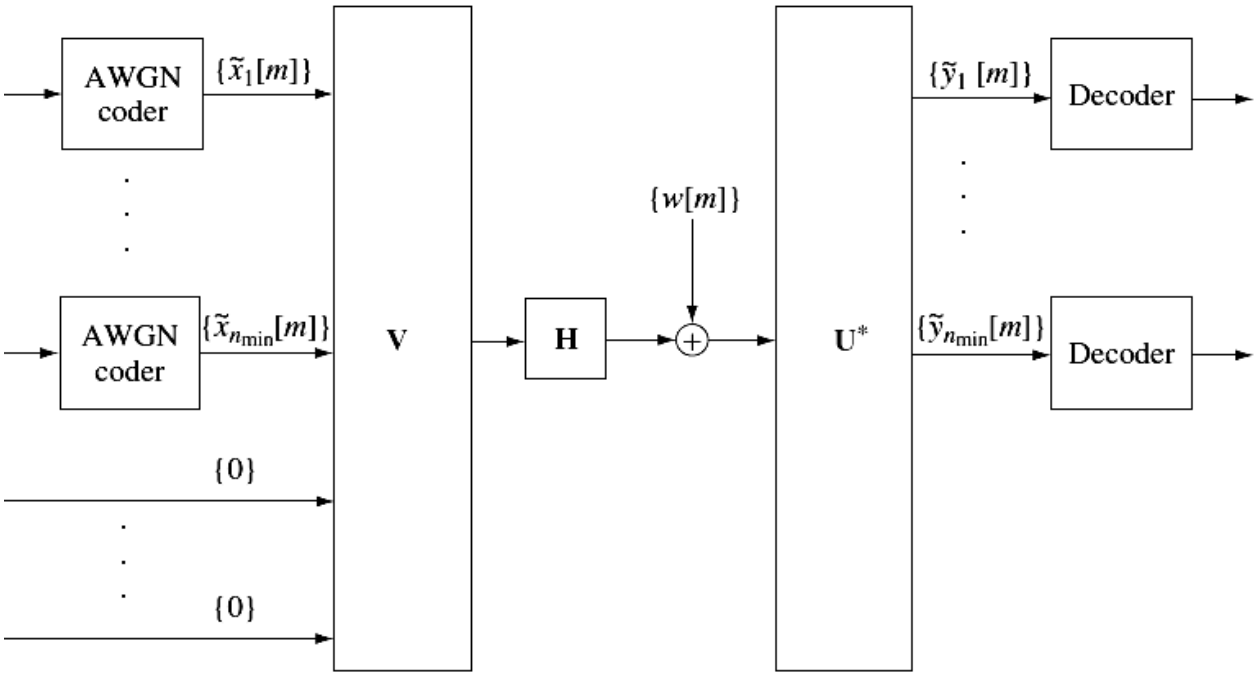
$$C = \sum_{i=1}^{n_{\min}} \log(1 + \frac{P_i^* \lambda_i^2}{N_0}) \qquad bits/s/Hz \qquad (۱۰-۲)$$

به‌طوری‌که $P_1^*, P_2^*, ..., P_{n_{\min}}^*$ نشان‌دهنده تخصیص توان به روش waterfilling است:

$$P_i^* = (\mu - \frac{N_0}{\lambda_i^2})^t \qquad (۱۱-۲)$$



شکل ۲-۱: تبدیل کانال MIMO به کانال‌های موازی با استفاده از SVD [18].



شکل ۲-۲: ساختار SVD در مخابرات MIMO [18].

μ به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که کل توان مساوی $\sum_i P_i^* = P$ شود. شکل ۲-۲ ساختار پایه‌ای SVD را در یک مخابرات امن نشان می‌دهد. آنچه که به‌طور واضح در این ساختار دیده می‌شود این است که سیستم مبدل V و U، ماتریس کانال را به زیرکانال‌های موازی و مستقل از هم تبدیل می‌کند.

مدل کانال باند باریک MIMO به‌صورت زیر فرض می‌شود:

$$\underline{y} = H\underline{x} + \underline{w} \qquad (۱۲-۲)$$

که این مدل دارای n_t آنتن فرستنده و n_r آنتن گیرنده است. آرایه آنتن‌ها به طور خطی و یکنواخت توزیع شده‌اند و فاصله آن‌ها به‌ترتیب نسبت به L_t (طول آرایه آنتن‌ها در فرستنده) و L_r (طول آرایه آنتن‌ها در گیرنده) نرمالیزه شده است. تفکیک نرمالیزه بین آنتن‌های فرستنده $\Delta_t = L_t / n_t$ است و تفکیک بین آنتن‌های گیرنده $\Delta_r = L_r / n_r$ است. عمل نرمالیزه کردن با استفاده از طول موج λ_c باند میانی سیگنال ارسالی انجام می‌شود [19]. برای راحتی فرض می‌شود کانال H نسبت به زمان ثابت است. هم‌چنین فرض می‌شود تعدا دلخواهی مسیر فیزیکی بین فرستنده و گیرنده وجود

دارد. iامین مسیر دارای ضریب تضعیف a_i است. این مسیر زاویه φ_{t_i} ($\Omega_{t_i} = \cos\varphi_{t_i}$) را با آرایه آنتن‌های فرستنده و زاویه φ_{r_i} ($\Omega_{r_i} = \cos\varphi_{r_i}$) را با آرایه آنتن‌های گیرنده می‌سازد. ماتریس کانال H به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$H = \sum_i a_i^b e_r(\Omega_{r_i}) e_t(\Omega_{t_i})^* \qquad (۱۳-۲)$$

به‌طوری‌که داریم:

$$a_i^b = a_i \sqrt{n_t n_r} \exp(-\frac{j2\pi d^{(i)}}{\lambda_c}) \qquad (۱۴-۲)$$

هم‌چنین $d^{(i)}$ فاصله بین آنتن فرستنده اول و آنتن گیرنده اول در طول مسیر iام است.

۲-۲ مفهوم سیستم OFDM

فرض می‌شود یک سیستم ارسال دیجیتال با مدولاسیون خطی داریم. طول سمبل را با T_s نشان می‌دهیم. B نشان‌دهنده پهنای باند است که واحد آن T_s^{-1}است. برای مثال، $B = (1+\alpha)T_s^{-1}$ پهنای باند یک پالس کسینوسی با ضریب αاست. برای یک کانال با تأخیر τ_m، اگر شرط زیر برقرار باشد، تداخل بین سمبلی (ISI)[1]، قابل تحمل خواهد بود [19]:

$$\tau_m \le T_s \qquad (۱۵-۲)$$

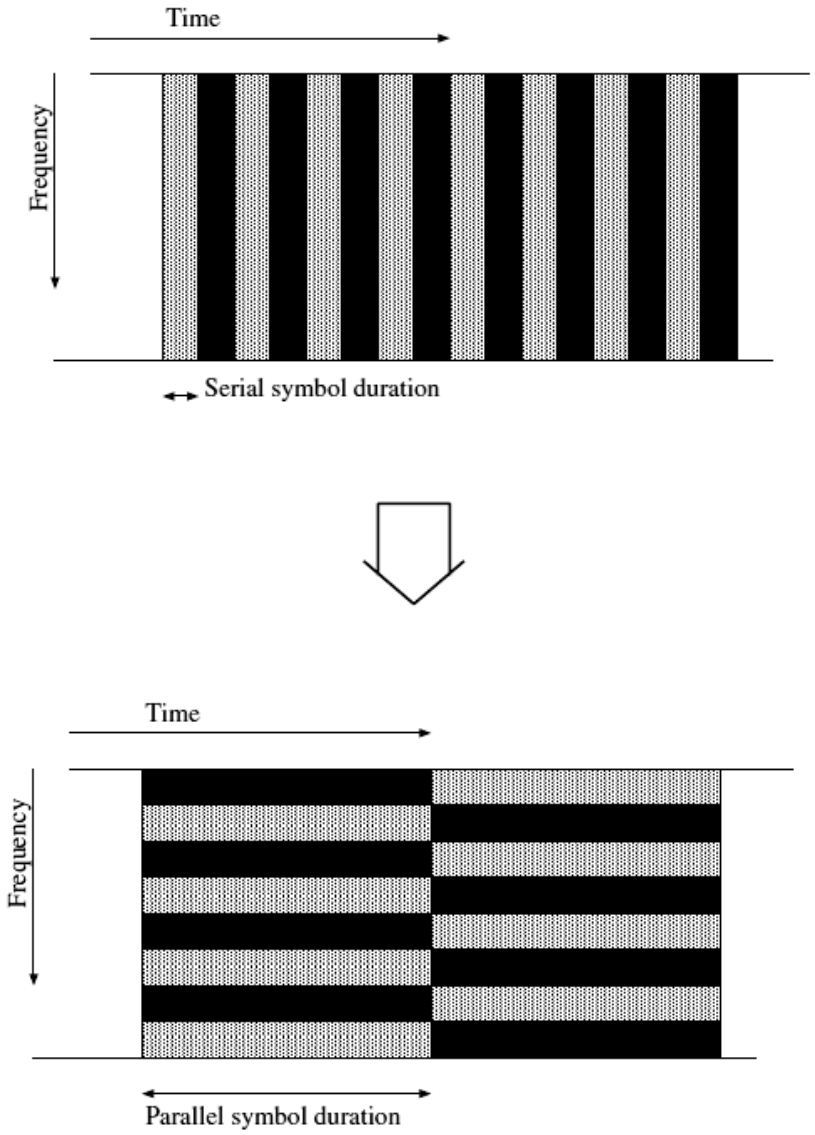
به عبارت دیگر، نرخ بیت ممکن $R_b = \log_2(M)T_s^{-1}$، برای یک مدولاسیون داده شده، به گسترش تأخیر کانال محدود می‌شود [20].

یک ایده آسان برای غلبه بر این محدودیت، این است که جریان داده به K زیر داده تقسیم شود، به‌طوری‌که این زیرجریان‌ها نرخ دامنه کمتری دارند. ارسال این زیرجریان‌ها برای $K = 8$، در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. این ارسال‌ها می‌تواند به صورت ارسال‌های موازی در حوزه فرکانس درنظر گرفته شود. این روش روی کل پهنای باند اثر نمی‌گذارد. هر زیرکاریری دارای پهنای باند B/K و طول سمبل KT_s است. ضریب K نمی‌تواند به‌طور دلخواه افزایش

[1] Inter-Symbol Interference

یابد، زیرا در این صورت، طول سمبل‌ها خیلی طولانی می‌شود و ارسال‌ها نسبت به زمان ناهمدوسی[1] کانال حساس می‌شوند. همچنین حداکثر فرکانس داپلر[2] $\nu_{\max}$ ، از شرط زیر به‌دست می‌آید:

$$\nu_{\max} T_s << 1 \qquad (۱۶-۲)$$



شکل ۲-۳: مفهوم با چند حامل [20].

[1] Non-Coherent
[2] Doppler Frequency

اگر ضریب همدوسی $\kappa = \nu_{\max}\tau_m$ به گونه‌ای انتخاب شود که $\kappa << 1$ باشد، آنگاه هر دو شرط (۲-۱۵) و (۲-۱۶) به‌طور هم‌زمان معتبر خواهد بود. می‌دانیم برای ضریب به اندازه کافی کوچک κ، یک طول سمبل T_s وجود دارد که هر دو شرط فوق با هم برقرار می‌شود و شرایط ارسال بهتری به کانال می‌دهد. می‌توان این طول سمبل بهینه را طوری انتخاب کرد که کاملاً با کانال منطبق باشد.

دو راه حل ممکن برای پیاده‌سازی ایده چندحاملی وجود دارد. هر دو راه حل از نظر خصوصیات ارسال با هم معادل هستند. اگرچه به لحاظ ریاضی شبیه هم هستند ولی از دیدگاه مفهومی کمی با هم فرق دارند. اولی، مفهوم چندحاملی را با داشتن K حامل که به‌طور مستقل از هم مدوله شده‌اند، تأیید می‌کند. دومی، بر مبنای یک گروه از K فیلتر همسایه میان‌گذر است که با استفاده از جریان داده موازی تحریک می‌شود و ارسال‌های موازی در حوزه فرکانس را شکل می‌دهد. این مفهوم معمولاً در سیستم‌های عملی پیاده‌سازی می‌شود.

مفهوم اول، فرکانس زیرحامل‌ها را ثابت نگه می‌دارد و برای هر زیرحامل، مدولاسیون را در جهت زمانی درنظر می‌گیرد. مفهوم دوم یک قطعه زمانی به طول T_s را ثابت در نظر می‌گیرد و مدولاسیون را برای هر قطعه زمانی در جهت فرکانس درنظر می‌گیرد [20].

در روش اول، جریان داده به K زیر جریان موازی با هم تقسیم می‌شود و هر کدام در زیرحامل خود، یعنی در فرکانس f_k، در باند پایه مختلط مدوله می‌شود که با استفاده از موج هارمونیک $\exp(j2\pi f_k t)$ توصیف می‌شوند. سمبل‌های مدولاسیون (QAM یا PSK) با s_{kl} نشان داده می‌شود، به‌طوری‌که k اندیس حوزه فرکانس و l اندیس حوزه زمان است. این روش با ارسال پالس $g(t)$ در باند پایه، در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. جریان داده موازی، فیلتر پالسی شکل یکسان $g(t)$ را تحریک می‌کند. سیگنال‌های فیلتر شده روی کاریرهای مختلف، مدوله می‌شوند و همگی قبل از ارسال با هم جمع می‌شوند. سیگنال باند پایه مختلط به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$s(t) = \sum_k e^{j2\pi f_k t} \sum_l s_{kl}\, g(t - lT_s) \qquad (۲-۱۷)$$

به‌طوری‌که T_s طول سمبل‌های موازی است. برای انعطاف‌پذیری بیشتر، اندیس حوزه‌های جمع مشخص نمی‌شود. برای راحتی می‌توان اندیس زمانی l را از صفر یا منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت انتخاب کرد. از آنجایی‌که هر ارسال حقیقی،