

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2016	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 15 de Noviembre de 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Neiva

Los suscritos: Ángel Eduardo Carvajal Prieto con C.C. No. 1075277444 y Albert Enrique Ramírez Cerquera con C.C. No. 1081413118, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado Transmisión de Video Adaptativa empleando Sistemas MIMO Híbridos basados en el Modelo Tensorial PARAFAC presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico, autorizo(amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

CARTA DE AUTORIZACIÓN



CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2016

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Ángel Eduardo Carvajal Prieto

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Albert Enrique Ramírez Cerquera

Firma:

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2016	PÁGINA	1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Transmisión de Video Adaptativa empleando Sistemas MIMO Híbridos basados en el Modelo Tensorial PARAFAC

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Carvajal Prieto	Ángel Eduardo
Ramírez Cerquera	Albert Enrique

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bravo Obando	Martín Diomedes

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Electrónico

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Electrónica

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2016

NÚMERO DE PÁGINAS: 92

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2016	PÁGINA	2 de 4

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos Ilustraciones en general
 Grabados Láminas Litografías Mapas Música impresa Planos
 Retratos Sin ilustraciones Tablas o Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Ninguno

MATERIAL ANEXO: Ninguno

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. MIMO	MIMO	6. H.265	H.265
2. PARAFAC	PARAFAC	7. Inalámbricas	Wireless
3. AVC	AVC	8. Codificación	Codification
4. HEVC	HEVC	9. Tensor	Tensor
5. H.264	H.264	10. Señal	Signal

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2016	PÁGINA	3 de 4

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En este trabajo se presenta un esquema de comunicaciones MIMO híbrido basado en el modelo tensorial PARAFAC para la transmisión de video. Los sistemas MIMO híbrido utilizan conjuntamente la multiplexación espacial, orientada a aumentar la tasa de transmisión, y la ganancia por diversidad, en el que se pretende incrementar la calidad de la transmisión al enviar información redundante. Uno de los retos que introduce un esquema de transmisión híbrido en el que la multiplexación espacial y la ganancia por diversidad se utilizan simultáneamente es la detección de canal. Dada la naturaleza multidimensional que posee la señal recibida en el sistema híbrido y sus características relacionadas con el álgebra multilineal, en este trabajo se modela la señal recibida como un tensor tridimensional, o de tercer orden, y se utiliza la descomposición PARAFAC como un método de estimación de canal conjunto, sin recurrir a ningún conocimiento previo del canal de comunicaciones, como secuencias de entrenamiento, por ejemplo. Además, se exponen dos algoritmos para la transmisión de video diseñados especialmente para sacar provecho del sistema de comunicaciones MIMO híbrido presentado. Los algoritmos propuestos fueron diseñados basados en los estándares H.264/AVC y H.265/HEVC.

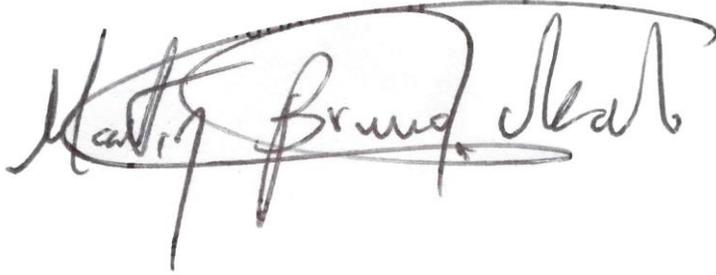
ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

In this thesis, a hybrid MIMO scheme for video transmission based on the PARAFAC model is presented. Hybrid MIMO schemes use both spatial multiplexing, aimed at improving the transmission rate, and transmit diversity, aimed at improving the radially of the transmission by sending redundancy copies of information. One of the challenges of hybrid schemes, in which spatial multiplexing and transmit diversity is used, is channel detection. Given the multidimensional nature of the received signal in hybrid systems and its characteristics related to multilinear algebra, the received signal is modelled as an 3D tensor, or a third order tensor, and the PARAFAC decomposition is used as a method of channel estimation, without resorting to any prior knowledge about the channel, like training sequences. Moreover, two algorithms for video transmission specially designed for taking advantage of the hybrid MIMO scheme is presented. The proposed algorithms were built based on the H.264/AVC and H.265/HEVC standards.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2016	PÁGINA	4 de 4

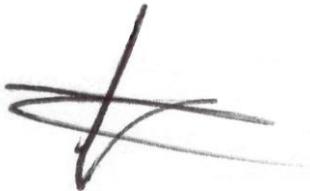
APROBACIÓN DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Martín Diomedes Bravo Obando



Firma:

Nombre Jurado: Jesús David Quintero Polanco



Firma:

Nombre Jurado: Julián Adolfo Ramírez Gutiérrez



Firma:

**TRANSMISIÓN DE VIDEO ADAPTATIVA EMPLEANDO
SISTEMAS MIMO HÍBRIDOS BASADOS EN EL MODELO
TENSORIAL PARAFAC**

ALBERT ENRIQUE RAMÍREZ CERQUERA

Código: 2011198297

ÁNGEL EDUARDO CARVAJAL PRIETO

Código: 20111100833

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA – HUILA
2016

TRANSMISIÓN DE VIDEO ADAPTATIVA EMPLEANDO
SISTEMAS MIMO HÍBRIDOS BASADOS EN EL MODELO
TENSORIAL PARAFAC

ALBERT ENRIQUE RAMÍREZ CERQUERA

Código: 2011198297

ÁNGEL EDUARDO CARVAJAL PRIETO

Código: 20111100833

Trabajo de grado

Director

PhD(c) Martín Diomedes Bravo Obando

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA – HUILA
2016

A mis padres y hermano
Albert Enrique Ramírez Cerquera

A mis padres y hermanos
Ángel Eduardo Carvajal Prieto

Agradecimientos

Quisiéramos ofrecer nuestros más sinceros agradecimientos al Ing. PhD(c). Martín Diomedes Bravo Obando por habernos concedido la oportunidad de participar en las actividades investigativas que dirigió, lo que, sin duda, nos motivó a dar nuestro primeros pasos en el mundo de la investigación y de donde decidimos empezar este trabajo. Asimismo, hubiera sido imposible el desarrollo de esta tesis sin su orientación y oportunas y muy sesudas ideas y recomendaciones durante todo el tiempo que tomó su desarrollo.

También estamos muy agradecidos con nuestras familias. Este trabajo de grado no habría podido concluirse sin el constante apoyo y motivación de nuestros padres y hermanos, quienes siempre estuvieron presentes alentándonos en momentos de dificultad, y quienes con cariño soportaron nuestro mal humor producto de las noches de desvelo.

Finalmente, agradecemos a todos los que de alguna manera hicieron parte de este trabajo de grado.

*Albert Enrique Ramírez Cerquera y
Ángel Eduardo Carvajal Prieto*

Resumen

El crecimiento acelerado de los sistemas de comunicaciones en las últimas décadas ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan satisfacer los retos inherentes a este, como la alta demanda de contenidos multimedia de calidad superior.

Una de las tecnologías desarrolladas para incrementar las capacidades del canal de comunicaciones es el uso de múltiples antenas en el lado transmisor y receptor, conocida como *Multiple-input Multiple-output* (MIMO). MIMO se ha convertido en una parte fundamental de los principales estándares de comunicaciones inalámbricas. Se han desarrollado múltiples esquemas de transmisión MIMO orientados a explotar las ventajas de esta tecnología, como la multiplexación espacial, orientada a aumentar las tasas de transmisión sin sacrificar el ancho de banda, y la ganancia por diversidad, en el que se pretende incrementar la calidad de la transmisión, relacionada con el envío de información redundante. Esta tesis presenta un sistema MIMO que combina los esquemas de transmisión MIMO multiplexación espacial y ganancia por diversidad.

Una de los retos que introduce un esquema de transmisión híbrido en el que la multiplexación espacial y la ganancia por diversidad se utilizan simultáneamente es la detección del canal. Dada la naturaleza multidimensional que posee la señal recibida en el sistema híbrido y sus características relacionadas con el álgebra multilineal, en esta tesis se modela la señal recibida como un tensor tridimensional, o de tercer orden, y se utiliza el método de descomposición tensorial conocido como PARAFAC como un método de estimación del canal conjunto. La unicidad matemática de la descomposición PARAFAC es la ventaja más importante de este método. Asimismo, una de las características más interesantes que introduce el uso de la descomposición tensorial en la estimación del canal es el hecho de que el receptor no requiere del uso de ninguna información relacionada con el canal para hallar una estimación de este.

Dado que la infraestructura de los sistemas de comunicaciones ha evolucionado para proporcionar mejor calidad de servicio en la transmisión de servicios multimedia, como video en alta definición, en el campo del procesamiento de video también se han desarrollado múltiples métodos para contribuir a este fin.

La transmisión de video adaptativa es un concepto interesante en nuestros días, ya que el hecho de modificar el modelo tradicional de capas en una arquitectura de red hace que el sistema sea cambiante de acuerdo al tipo de servicio que se está prestando y por ende sea más inteligente. Este tipo de modificación se llama optimización *Cross-Layer* y su concepto ha sido ampliamente estudiado. En este trabajo se proponen dos algoritmos de transmisión de video adaptativa que ayudan a mejorar la calidad de este cuando es reconstruido en el decodificador del sistema de comunicaciones MIMO híbrido PARAFAC propuesto. Estos algoritmos procesan los paquetes de video de forma especial, aprovechando sus características particulares para ajustar de forma inteligente el sistema de transmisión y así garantizar una mejor calidad en el receptor al momento de visualizar el video.

Índice general

Lista de Acrónimos	VIII
1. Fundamentos de comunicaciones inalámbricas digitales	7
1.1. Introducción	7
1.2. MIMO	7
1.2.1. Diversidad espacial	8
1.2.2. Multiplexación espacial	9
1.3. Turbo codificación	10
1.4. Modulación	12
1.5. OFDM	13
1.6. Canales inalámbricos	14
1.6.1. Multitrayecto y desvanecimiento	15
1.6.2. Desvanecimiento plano	16
1.6.3. Desvanecimiento selectivo en frecuencia	16
1.6.4. Canal de desvanecimiento Rayleigh	17
2. Codificación de video	19
2.1. Introducción	19

2.2.	¿Qué es H.264/AVC?	20
2.3.	Proceso de codificación/decodificación	20
2.3.1.	Codificación	20
2.3.2.	Decodificación	23
2.4.	Sintaxis de alto nivel	24
2.5.	Modos de empaquetamiento RTP para H.264	25
2.6.	Rendimiento del codificador H.264	26
2.7.	¿Qué es H.265/HEVC?	26
2.8.	Diseño y características del codificador HEVC	27
2.8.1.	Capa de codificación de video	27
2.8.2.	Arquitectura de la sintaxis de alto nivel	28
2.8.3.	Sintaxis de la decodificación paralela	28
2.9.	Sintaxis de alto nivel	29
2.10.	Modos de empaquetamiento RTP para H.265	29
3.	Modelo tensorial PARAFAC	31
3.1.	Introducción	31
3.2.	Teoría de tensores	32
3.2.1.	Notación	32
3.2.2.	Definición	32
3.2.3.	Representaciones extendidas de un tensor	32
3.2.4.	Tensores de rango uno	33
3.2.5.	Rango de un tensor	34
3.2.6.	Productos matriciales	35

3.3.	Descomposición tensorial	35
3.3.1.	Descomposición PARAFAC (Parallel Factor Analysis)	36
3.3.2.	Unicidad	37
3.4.	Alternating Least Squares (ALS)	39
3.5.	Sistema de comunicaciones MIMO híbrido	40
3.5.1.	Señal recibida como un tensor	41
4.	Algoritmos propuestos para transmisión de video adaptativa, resultados y análisis	43
4.1.	Introducción	43
4.2.	Transmisión de video adaptativa	43
4.3.	Optimización Cross-Layer	44
4.4.	Algoritmos propuestos para transmisión de video adaptativa	45
4.4.1.	Algoritmo de transmisión de video AVC	45
4.4.2.	Algoritmo de transmisión de video HEVC	47
4.5.	Resultados del rendimiento del sistema PARAFAC MIMO híbrido	49
4.6.	Resultados de transmisión de video de forma adaptativa	52
4.6.1.	Parámetros de simulación	52
4.6.2.	Resultados de evaluación subjetiva	53
4.6.3.	Resultados de la evaluación cuantitativa	62
4.7.	Conclusiones	66
4.7.1.	Recomendaciones y trabajo futuro	67

Índice de figuras

1.1. Codificación de Alamouti. Imagen de [3]	9
1.2. Multiplexación espacial MIMO. Imagen de [1]	10
1.3. Diagrama de bloques de un turbo codificador. Imagen de [1]	11
1.4. Transmisor OFDM básico. Imagen de [3]	13
1.5. Desvanecimiento plano. Imagen de [7]	16
1.6. Desvanecimiento selectivo en frecuencia. Imagen de [7]	17
2.1. Prediction	22
2.2. Recontruction	24
3.1. <i>Slices</i> de un tensor de tercer orden. Imagen de [15]	33
3.2. Tensor de tercer orden de rango uno $\mathcal{X} = \mathbf{a} \circ \mathbf{b} \circ \mathbf{c}$. Imagen de [15]	34
3.3. Descomposición PARAFAC de un tensor tridimensional. Imagen de [15]	36
4.1. Posible interacción entre las capas [21]	44
4.2. Diagrama de algoritmo de transmisión de video adaptativo AVC.	46
4.3. Diagrama de algoritmo de transmisión de video adaptativo HEVC.	48
4.4. Rendimiento del sistema con modelo PARAFAC	51
4.5. Resultados de transmisión de video <code>akiyo_cif.yuv</code> AVC	54
4.6. Resultados de transmisión de video <code>bridgeclose_qcif.yuv</code> AVC	55

4.7. Resultados de transmisión de video <code>bridgefar_cif.yuv</code> AVC	55
4.8. Resultados de transmisión de video <code>bus_cif.yuv</code> AVC	56
4.9. Resultados de transmisión de video <code>carphone_qcif.yuv</code> AVC	56
4.10. Resultados de transmisión de video <code>foreman_cif.yuv</code> AVC	57
4.11. Resultados de transmisión de video <code>mobile_cif.yuv</code> AVC	57
4.12. Resultados de transmisión de video <code>news_cif.yuv</code> AVC	58
4.13. Resultados de transmisión de video <code>akiyo_cif.yuv</code> HEVC	59
4.14. Resultados de transmisión de video <code>bridgeclose_qcif.yuv</code> HEVC	59
4.15. Resultados de transmisión de video <code>bridgefar_cif.yuv</code> HEVC	60
4.16. Resultados de transmisión de video <code>bus_cif.yuv</code> HEVC	60
4.17. Resultados de transmisión de video <code>carphone_qcif.yuv</code> HEVC	61
4.18. Resultados de transmisión de video <code>foreman_cif.yuv</code> HEVC	61
4.19. Resultados de transmisión de video <code>mobile_cif.yuv</code> HEVC	62
4.20. Resultados de transmisión de video <code>news_cif.yuv</code> HEVC	63
4.21. Resultados de la comprobación del algoritmo de transmisión adaptativo AVC.	64
4.22. Resultados de la comprobación del algoritmo de transmisión adaptativo HEVC.	65

Índice de cuadros

1.1. Tasas utilizadas en turbo codificadores especificadas en estándares . . .	12
2.1. Unidades NAL presentes en H.264/AVC h264/AVC	25
2.2. Unidades NAL presentes en H.265/HEVC [12].	30
4.1. Parámetros de configuración del turbo código	49
4.2. Parámetros de <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> (OFDM) utilizados en simulación	50
4.3. Secuencias de video empleadas para la simulación.	53

Introducción

Motivación

En los últimos años la gran popularidad de los teléfonos inteligentes ha ocasionado un cambio en la forma en que los usuarios consumen servicios multimedia a través de internet. Los usuarios exigen gran calidad del servicio mientras reproducen secuencias de video en tiempo real en condiciones de movimiento, cuando viajan en el transporte público, por ejemplo, o mientras sostienen video conferencias en sus dispositivos móviles. La masificación de este tipo de servicios representa un gran reto técnico para los sistemas de comunicaciones inalámbricos. Eso nos motiva a trabajar en nuevas técnicas de transmisión que contribuyan a mejorar la calidad de estos servicios.

El desarrollo de la infraestructura que permita soportar y ofrecer estos servicios representa un gran reto técnico. La inclusión de múltiples antenas en ambos lados del enlace en un sistema de comunicaciones inalámbricas, conocido como MIMO por sus siglas en inglés (*Multiple-Input Multiple-Output*), es una de las tecnologías clave que han sido propuestas en estándares de comunicaciones como solución para mejorar la transmisión. Asimismo el campo del procesamiento de señales es una solución fundamental en el desarrollo de sistemas de transmisión. Múltiples propuestas se presentan en la literatura académica y la investigación es intensa.

Uno de los problemas técnicos en la transmisión de información es el conocimiento del canal de comunicaciones en el receptor, que es necesario para la recuperación de la información transmitida. La identificación del canal usualmente utiliza secuencias de entrenamiento. Estas secuencias de entrenamiento son enviadas por el transmisor periódicamente y de las cuales el receptor tiene completo conocimiento. Sin embargo, la transmisión de estas secuencias afecta inevitablemente la tasa de transmisión. Por esta y otras razones se han desarrollado técnicas de procesamiento conocidas como detección ciega, que se basa en la identificación del canal sin ningún conocimiento previo. En este trabajo de grado presentamos un sistema de comunicaciones MIMO híbrido para el cual desarrollamos una técnica de procesamiento de señales basada en el modelo matemático tensorial conocido como *análisis de factores paralelos*, llamado PARAFAC por sus siglas

en inglés (*Parallel Factor Analysis*), como método para la detección de canal ciego.

De otro lado, en el campo del procesamiento de video se han desarrollado técnicas de compresión que ayudan a eliminar información redundante con el objetivo de reducir su tamaño. Entre esos formatos de compresión se encuentran el AVC/H.264, desarrollado en el año 2003, y el HEVC/H.265, desarrollado en el 2013. Desarrollar algoritmos para la transmisión de video de alta calidad es también un reto técnico importante y una necesidad latente. En este trabajo, proponemos dos algoritmos para la transmisión de video codificado en AVC y HEVC.

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de grado es el desarrollo de un modelo de comunicaciones MIMO híbrido basado en la operación análisis de factores paralelos para la transmisión de video codificado en AVC y HEVC, para el que se propone, además, un algoritmo de transmisión adaptativo. A continuación se detallan los objetivos propuestos:

- Proponer un modelo de transmisión MIMO híbrido basado en PARAFAC.
- Crear algoritmos de transmisión adaptativos para transmitir video codificado en AVC y HEVC, en sistemas MIMO híbridos basados en PARAFAC.
- Poner a prueba el sistema de transmisión propuesto mediante simulaciones y comparar su rendimiento con otros sistemas tradicionales.
- Evaluar los algoritmos de transmisión de video propuestos mediante simulaciones y comparar su rendimiento con el de sistemas tradicionales.

Metodología

En el presente trabajo de grado se busca lograr transmisión de video por medio sistema propuesto de comunicaciones de múltiples antenas en el receptor y transmisor basado en el modelo tensorial PARAFAC junto con un algoritmo de transmisión de video adaptativo.

A continuación resumimos los pasos seguidos para el desarrollo de este trabajo.

Diseño de esquema de transmisión tensorial PARAFAC:

- Modelamiento de la señal recibida como un arreglo matemático tridimensional conocido como tensor.
- Modelamiento del sistema de comunicaciones MIMO híbrido con base en el modelo tensorial PARAFAC.
- Aplicación de un algoritmo de estimación tensorial conocido como mínimos cuadrados alternantes para la detección de canal y estimación de símbolos.
- Evaluación del rendimiento del sistema de comunicaciones MIMO híbrido basado en el modelo PARAFAC presentado.
- Comparación del sistema propuesto con un sistema MIMO híbrido sin modelo PARAFAC.

Diseño de algoritmos de transmisión de video adaptativa:

- Obtención de los codificadores H.264 y H.265 del instituto Fraunhofer, estos son proporcionados por ese instituto para la realización de investigaciones académicas.
- Selección de 7 secuencias de video de diferente naturaleza para posterior codificación empleando H.264 y H.265; además, mediante la creación de un programa en C++, se identifican las unidades NAL, que componen estas secuencias de video, y se empaquetaron según su especificación RTP.
- Con el conocimiento adquirido sobre la naturaleza de cada unidad NAL y su importancia para la reconstrucción del video, se desarrolla dos algoritmos para la transmisión de video de forma adaptativa.
- Toma de resultados del BER correspondientes al sistema de comunicaciones tradicional y al sistema PARAFAC. Posteriormente se realiza la simulación de la pérdida de paquetes de video para estos resultados y luego, aplicando los algoritmos de transmisión desarrollados, los videos se decodifican y se evalúan de forma visual y mediante PSNR.
- Redacción de conclusiones sobre la efectividad de los algoritmos.

Antecedentes

- *Adaptive real-time HEVC encoding of emergency scenery video* por Panayides, A.S.; Constantinides, A.G.; Pattichis, M.S.; Kyriacou, E. y Pattichis, C.S. Los autores proponen un framework adaptativo de video HEVC para la transmisión

inalámbrica de video en tiempo real de escenarios de emergencia. El objetivo del enfoque propuesto es adaptar los métodos de codificación de video para satisfacer las limitaciones en ancho de banda, calidad de video y rendimiento.

- *Tensor Video Coding* por Abo Talib Mahfoodh y Hayder Radha. Los autores proponen un framework de codificación de video basado en descomposición tensorial. Los resultados demuestran que el enfoque propuesto supera los métodos de codificación de video actuales que no dependen de la estimación del movimiento o la compensación.
- *Tensor space-time (TST) coding for MIMO wireless communication systems* por Gérard Faviera, Michele N. da Costaa, André L.F. de Almeida y João Marcos T. Romano. Aquí los autores proponen un esquema de codificación espacio temporal con tensores para sistemas de comunicaciones inalámbricos MIMO.
- *Tensor-Based Space-Time Multiplexing Codes for MIMO-OFDM Systems with Blind Detection* por de Almeida, Sophia Antipolis Favier, G. ; Cavalcante, C.C. y Mota, J.C.M. Se propone un código de multiplexación espacio temporal con un enfoque basado en tensores para ofrecer flexibilidad en la transmisión en sistemas MIMO OFDM.
- *Multi-user receiver processing for inter-cell interference reduction in pucch LTE* por Da Silva, I. L. J. En esta tesis de maestría, el autor propone dos receptores multiusuario para la reducción de la interferencia intercelda en el canal de control físico de subida (PUCCH) LTE. El receptor propuesto explota un enfoque alternativo que modela la transmisión en banda base de PUCCH como un tensor.

En el programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Surcolombiana se han desarrollado dos investigaciones relacionadas con la transmisión de video y con el modelamiento tensorial de sistemas de comunicaciones que quisieramos resaltar:

- *Evaluación del rendimiento de la estrategia AMC para transmisión de video sobre tecnología móvil 4G* por Carlos Trujillo y Miguel Montenegro. Los autores propusieron una arquitectura de capa cruzada para entrega de paquetes priorizada en redes MIMO-LTE.
- *Simulación y evaluación de arreglo de antenas MIMO para sistemas de comunicaciones inalámbricos mediante el uso del paradigma de tensores* por Daniela Trujillo Cabrera y Andrés Barrera Canchón. En esta tesis, los autores proponen un esquema de comunicaciones inalámbrico MIMO basado en tensores.

Alcances y limitaciones

Alcances

Este trabajo tendrá como alcances:

- El desarrollo de un algoritmo para la transmisión de video adaptativa.
- El diseño de un sistema de transmisión MIMO híbrido basado en el modelo tensorial de análisis de factores paralelos (PARAFAC).

Los alcances de este trabajo son meramente académicos y científicos. Esperamos contribuir al desarrollo de la investigación en la transmisión de video y a la producción intelectual de la Universidad.

Límites

El desarrollo y evaluación del sistema de comunicación inalámbrico propuesto y del algoritmo de transmisión adaptativo se realizará únicamente a nivel de simulación. También, dada la complejidad que supone la introducción de una dimensión adicional bajo el modelo tensorial y el procesamiento de video en general, las capacidades de los equipos de cómputo podrían imponer un límite cuando se pretendan evaluar ciertas características del sistema.

Organización

El contenido de este trabajo de grado está dividido en cuatro capítulos. A continuación se describe brevemente el contenido de cada capítulo.

Capítulo 1: Resumimos los fundamentos de un sistema de comunicaciones inalámbrico digital. Algunos de los temas tratados están relacionados con técnicas de múltiples antenas, modulación, codificación de canal y canales de multitrayecto, entre otros.

Capítulo 2: Se discuten los principios básicos de la codificación de video AVC y HEVC, se expone de manera detallada sus procesos, el tipo de unidades NAL que producen y la forma de empaquetarlas mediante su especificación RTP.

Capítulo 3: Introducimos la teoría fundamental de tensores y la operación de descomposición tensorial conocida como análisis de factores paralelos (PARAFAC).

Presentamos la unicidad de PARAFAC y el algoritmos de mínimos cuadrados alternante. Concluimos el capítulo con el sistema de comunicaciones basado en PARAFAC.

Capítulo 4: Se presentan los resultados de este trabajo, se exponen los algoritmos propuestos para la transmisión de video adaptativa, la validación de las simulaciones empleadas y los resultados de evaluación subjetiva y mediante PSNR de las secuencias de video empleadas.

Capítulo 1

Fundamentos de comunicaciones inalámbricas digitales

1.1. Introducción

La transmisión de radio y televisión, comunicaciones satelitales y sistemas móviles, entre otras, son aplicaciones de sistemas de comunicaciones inalámbricas. Recientemente, los sistemas de comunicaciones inalámbricas se ha convertido de gran interés y han generado una gran actividad investigativa, principalmente desde los 90, desde el desarrollo de la tecnología de segunda generación (2G), que reemplazó la tecnología analógica por la digital. Para toda aplicaciones de sistemas de comunicaciones inalámbricas se deben desarrollar sistemas que soporten la alta demanda de servicios multimedia de alta calidad. En el presente capítulo se presentan los aspectos fundamentales de los sistemas de comunicaciones inalámbricas digitales.

1.2. MIMO

Uno de los principales objetivos de los sistemas de comunicaciones actuales es alcanzar tasas de transmisión de datos altas, dado el constante crecimiento de la demanda y exigencia de los usuarios, especialmente en servicios multimedia.

Como una solución para satisfacer esta necesidad, nace un enfoque que consiste en la disposición de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor en un enlace de comunicaciones. Esta técnica se conoce como MIMO.

MIMO permite mejorar la comunicación de dos maneras: aumentando la velocidad

de transmisión e incrementando la fiabilidad de la transmisión. Estas características describen dos principales categorías de esta tecnología, a saber, diversidad espacial y multiplexación espacial.

1.2.1. Diversidad espacial

En la diversidad espacial, múltiples copias de la señal de información modulada, símbolos, son enviadas por diferentes antenas transmisoras simultáneamente. A esta técnica MIMO se le conoce también como codificación espacio temporal por bloques, *Space-Time Block Coding* (STBC)¹. La redundancia en esta técnica permite contrarrestar los efectos de desvanecimiento que introduce el canal en la señal de información.

MIMO con diversidad espacial está orientado a mejorar la robustez y la confiabilidad de la transmisión, al proporcionar al receptor múltiples copias de la señal, pero sin aumentar la velocidad de transmisión.

Un canal MIMO con N_{tx} antenas transmisoras y N_{rx} antenas receptoras ofrece $M_{tx} \times M_{rx}$ enlaces de desvanecimiento independientes, y por lo tanto una diversidad espacial de orden $N_{rx} \times N_{tx}$ ²

Codificación de Alamouti

Una de las formas más simples de STBC es el código de Alamouti para dos antenas transmisoras. En este código, pares de símbolos modulados (s_1, s_2) son enviados por la primera y segunda antena simultáneamente para el primer periodo de símbolo. En el siguiente periodo, los símbolos son invertidos y conjugados $(-s_2^*, s_1^*)$ y enviados por la primera y segunda antena respectivamente.

Sean r_1 y r_2 las señales recibidas en el primer y segundo periodo de símbolo, respectivamente, entonces:

$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \quad (1.1)$$

$$r_2 = -h_1 s_1^* + h_2 s_2^* + n_2 \quad (1.2)$$

Donde n_1 y n_2 son los ruidos aditivos en el primer y segundo instante de tiempo respectivamente. h_1 y h_2 representan la respuesta frecuencial de los canales de transmisión entre las antenas transmisoras y receptora.

¹H. Zarrinkoub, *Understanding LTE with MATLAB: from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation*. John Wiley & Sons, Ltd., 2014.

²E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides y col., *MIMO Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2007.

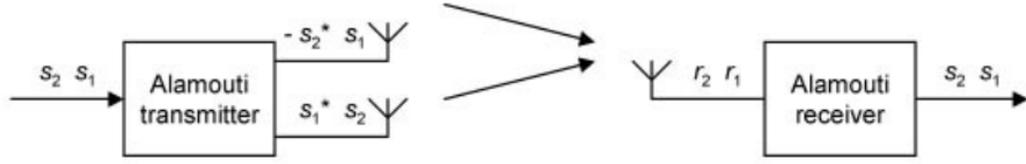


Figura 1.1: Codificación de Alamouti. Imagen de [3]

1.2.2. Multiplexación espacial

En la multiplexación espacial, múltiples símbolos independientes de la señal de información son enviados simultáneamente por cada antena transmisora. La multiplexación espacial favorece la velocidad de transmisión del enlace de comunicaciones, toda vez que la tasa de transmisión se incrementa. En un sistema de transmisión con N_{tx} antenas transmisoras y N_{rx} antenas receptoras la tasa de transmisión se hace proporcional al producto $N_{rx} \times N_{tx}$.

La multiplexación espacial puede llevarse a cabo solo si las señales de la información en la transmisión no están correlacionadas. Dada la naturaleza de un canal de comunicaciones que presenta multitrayecto y desvanecimiento las señales en el lado receptor del sistema no se encuentran correladas. Esta característica que introduce el canal en la señal de información es uno de los principales motivos por el que la multiplexación espacial permite mejorar el rendimiento de la transmisión.

La figura 1.2 muestra el diagrama de bloques de un sistema MIMO de multiplexación espacial para una configuración de dos antenas receptoras y dos transmisoras (2×2). Las señales x_1 y x_2 son transmitidas simultáneamente por dos antenas transmisoras. Estas señales se propagan por cuatro diferentes trayectorias en el canal de comunicaciones (h_{11}, h_{12}, h_{21} y h_{22}). En el lado receptor del enlace, las señales recibidas se pueden expresar como una combinación lineal de las señales transmitidas multiplicadas por cada respuesta frecuencial del canal con la adición de ruido *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Por lo tanto, las señales recibidas en la primera y segunda antena, respectivamente, notadas como y_1 y y_2 , se pueden expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$y_1 = h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + n_1 \quad (1.3)$$

$$y_2 = h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + n_2 \quad (1.4)$$

Matricialmente, el sistema de dos ecuaciones anterior se puede representar como

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

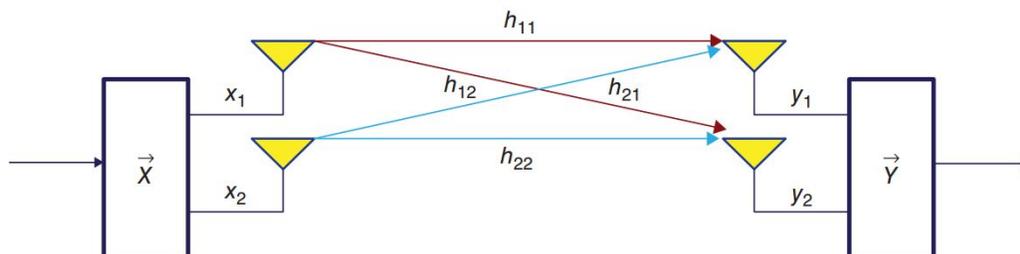


Figura 1.2: Multiplexación espacial MIMO. Imagen de [1]

Una ecuación generalizada en notación matricial para cualquier número de antenas transmisoras y receptoras puede escribirse como:

$$\vec{y} = H\vec{x} + \vec{n} \quad (1.6)$$

Donde \vec{x} representa el vector M-dimensional de señales transmitidas, \vec{y} el vector N-dimensional de señales recibidas, \vec{n} el vector de ruido y H la matriz de la respuesta frecuencial del canal de comunicaciones.

1.3. Turbo codificación

La codificación de canal es uno de las técnicas utilizadas para mejorar la confiabilidad de la transmisión al procurar la reducción de errores en la recuperación de la información. La señal del mensaje sufre múltiples degradaciones, como pérdidas de potencia y cambios en sus comportamiento frecuencial, debido al desvanecimiento y multitrayectoria que introduce el canal de comunicaciones. Estos cambios en la señal de información propician la generación de errores durante la decodificación de la señal de información. El objetivo principal de la codificación de canal es reducir la probabilidad de errores durante la decodificación al introducir bits de redundancia de cierta estructura, de acuerdo al algoritmo utilizado, a la secuencia binaria del mensaje original.

Los turbo códigos pertenecen a una categoría de algoritmos de codificación de canal conocidos como códigos convolucionales paralelos concatenados³. A continuación se muestra un diagrama de bloques de un turbo codificador.

³H. Zarrinkoub, *Understanding LTE with MATLAB: from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation*. John Wiley & Sons, Ltd., 2014.

De la figura 1.3 puede observarse que el codificador turbo está conformado por dos codificadores constituyentes de ocho estados paralelos entre sí y separados por un entrelazador. La salida del codificador turbo está conformada por tres secuencias. Los bits de la primera secuencia son los bits originales. Las otras dos secuencias de bits de salida pertenecen a los bits codificados por los codificadores constituyentes. El entrelazador justo antes del segundo codificador reordena los bits de información de manera pseudoaleatoria con el fin de asegurar que las salidas de los codificadores paralelos no sean las mismas, dado que estos en ocasiones pueden ser idénticos.

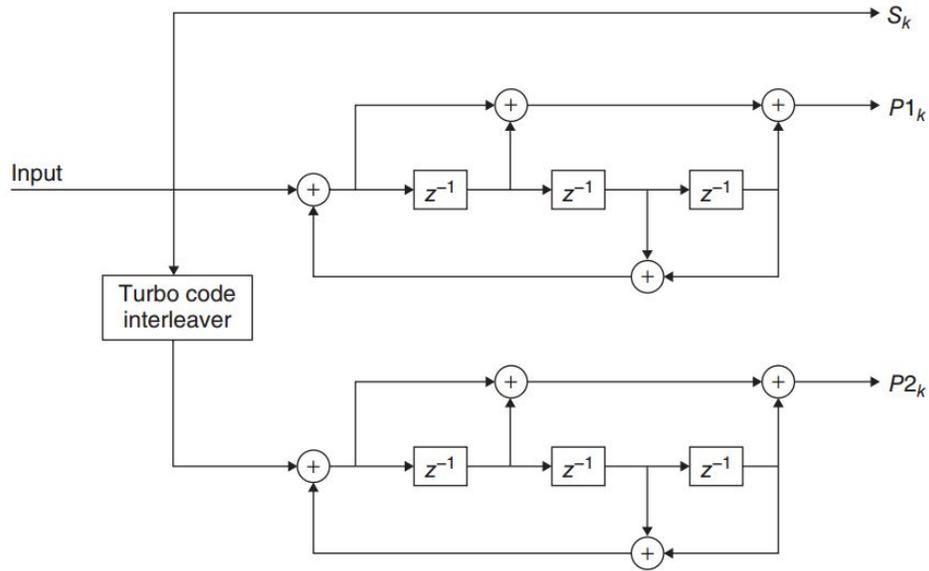


Figura 1.3: Diagrama de bloques de un turbo codificador. Imagen de [1]

La estructura de trellis de los codificadores constituyentes está descrita por los siguientes polinomios:

$$G_0(z) = 1 + z^{-2} + z^{-3} \quad (1.7)$$

$$G_1(z) = 1 + z^{-1} + z^{-3} \quad (1.8)$$

La tasa de codificación del turbo código de la figura 1.3 es de 1/3. El cuadro 1.1 muestra las tasas utilizadas en los turbo codificadores especificados en los principales estándares⁴.

En el lado receptor, el turbo decodificador invierte las operaciones llevadas a cabo por el codificador turbo. Está basado en el uso de dos decodificadores de probabilidad a posteriori y dos entrelazadores en un enlace de retroalimentación. El proceso de

⁴K. Gracie y M.-H. Hamon, «Turbo and turbo-like codes: principles and applications in telecommunications», *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, 2007.

Aplicación	tasas
CCSDS (deep space)	1/6, 1/4, 1/3, 1/2
3GPP (UMTS)	1/4, 1/3, 1/2
3GPP2 (CDMA2000)	1/4, 1/3, 1/2
3GPP LTE	1/4, 1/3, 1/2

Cuadro 1.1: Tasas utilizadas en turbo codificadores especificadas en estándares

decodificación es iterativo. El rendimiento y la complejidad computacional del decodificador turbo están directamente relacionados con el número de iteraciones ejecutadas⁵.

1.4. Modulación

La modulación es uno de los componentes más importantes de un sistema de comunicaciones. Facilita el envío de la información por el canal inalámbrico y reduce la incidencia del ruido y otros efectos del canal. La modulación se define como el proceso de modificar los parámetros de una onda de radio, conocida como portadora, tales como la amplitud o la fase, en función de otra señal que contiene la información del mensaje que va a transmitirse, llamada señal moduladora.

En un sistema de comunicaciones, en el lado transmisor, el modulador toma una secuencia de bits del mensaje y los codifica en una señal de radio (portadora) modificando uno o varios de sus parámetros, representada en símbolos. Los parámetros que varían depende del esquema de modulación utilizado.

Algunos de los esquemas de modulación más utilizados en los sistemas de comunicaciones inalámbricos actuales son la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura, *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), y la modulación de amplitud en cuadratura, *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), en sus formas 16QAM y 64QAM.

Un modulador QPSK toma dos bits del mensaje y los codifica en una señal de radio que puede tener cuatro estados diferentes. Estas variaciones de estado corresponden a un cambio de fase de 45° , 135° , 225° y 315° para las combinaciones binarias 00, 10, 11, 01, respectivamente. 16QAM utiliza cuatro bits y los envía simultáneamente para una onda portadora de 16 estado diferentes de amplitud y fase. 64QAM envía 16 bits y utiliza 64 estado diferentes.

⁵H. Zarrinkoub, *Understanding LTE with MATLAB: from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation*. John Wiley & Sons, Ltd., 2014.

1.5. OFDM

La Multiplexación por división de frecuencias ortogonales, OFDM, es una técnica de transmisión ampliamente utilizada en estándares de comunicaciones inalámbricas para contrarrestar los efectos del canal multitrayecto, como la interferencia intersimbólica. El principio de OFDM es subdividir un canal de ancho de banda amplia en el dominio de la frecuencia para multiplexar diferentes ondas portadoras moduladas, conocidas como subportadoras, en canales de banda estrecha pequeños y ortogonales entre sí.

La figura 1.4 muestra el diagrama de bloques de un transmisor OFDM básico. El transmisor recibe una secuencia binaria del mensaje original y la modula según el esquema de modulación utilizado, 4QAM, por ejemplo. Después, el conversor serie-paralelo, toma un bloque de símbolos y codifica cada símbolo en una de las subportadoras, correspondientes a cada canal, modificando su fase y amplitud. Las frecuencias han sido elegidas de tal forma que entre ellas se cumpla el principio de ortogonalidad.

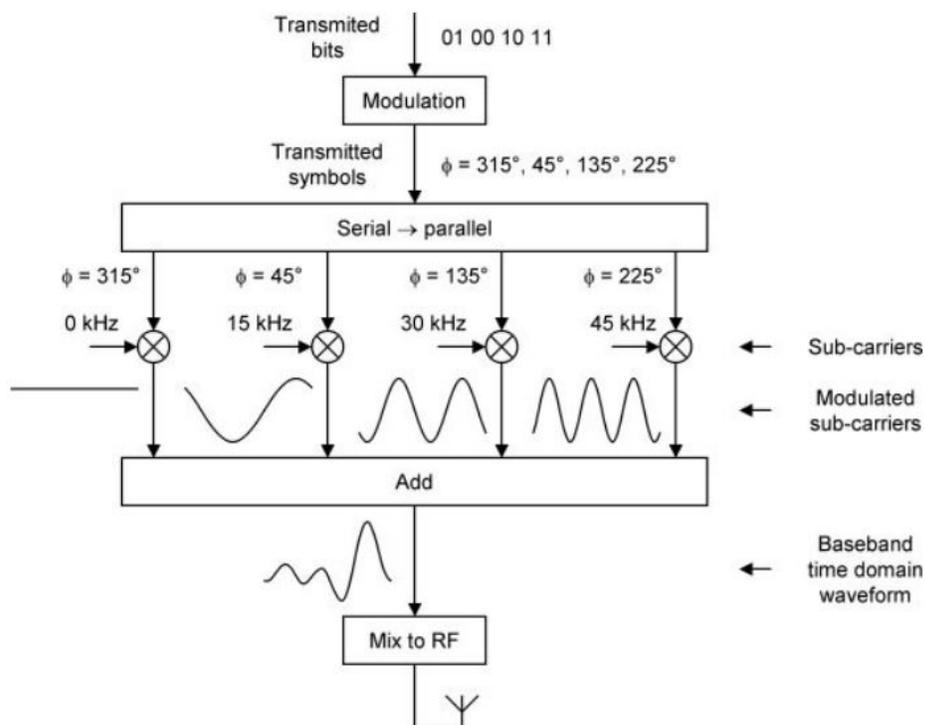


Figura 1.4: Transmisor OFDM básico. Imagen de [3]

Una vez las subportadoras han sido moduladas, se suman al final del transmisor para formar una sola señal en el dominio del tiempo. A continuación se convierte esta señal en una onda apropiada de radiofrecuencia para la transmisión.

Los datos al final de la etapa de conversión serie-paralela representan la amplitud y la fase de cada subportadora como una función de la frecuencia; después de la etapa de adición, los datos son representados como una función del tiempo. En esta última etapa, los datos se han convertido de una función del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo⁶. Con el fin de generar la salida de la etapa de adición, los componentes frecuenciales son convertidos a muestras en el dominio del tiempo realizando la inversa de la transformada de Fourier. La salida de esta transformación produce los símbolos OFDM.

En el lado receptor se realiza el proceso inverso, en el que se ejecuta el proceso opuesto a la inversa de la transformada de Fourier, para convertir los símbolos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

OFDM reduce el solapamiento de los símbolos transmitidos, conocido como interferencia intersimbólica, al transmitir los datos en múltiples subportadoras. Una de las técnicas utilizadas en OFDM para ayudar a contrarrestar este problema es la adición del prefijo cíclico.

El prefijo cíclico adiciona un periodo de guarda antes de cada símbolo; sin embargo, utiliza una porción del símbolo subsiguiente para rellenar dicho espacio. Así, si la duración del prefijo cíclico es superior al retardo generado por el canal, el receptor se asegura de leer solo un símbolo a la vez.

1.6. Canales inalámbricos

Una de las características más distintivas de los canales inalámbricos es el hecho de que existen múltiples caminos entre el transmisor y el receptor. La existencia de varios caminos resulta en la recepción de múltiples versiones de la señal transmitida. Estas versiones de la señal transmitida experimentan diferentes pérdidas por trayectoria y fases.

Si hay diferentes trayectorias entre el transmisor y el receptor, entonces existe lo que se conoce como línea de vista, *Line of Sight* (LOS). Una LOS no existe cuando objetos grandes obstruyen la línea entre el transmisor y el receptor. Aún cuando su potencia y fase pueden cambiar, es un cambio más predecible, ya que usualmente es solo una función de la distancia y de no muchos otros factores aleatorios. La LOS no es el único camino que una onda electromagnética puede tomar entre el transmisor y el receptor. Una onda puede sufrir reflexión cuando encuentra un objeto mucho más grande que su longitud de onda. A través de la reflexión de muchas superficies, la onda puede

⁶H. Zarrinkoub, *Understanding LTE with MATLAB: from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation*. John Wiley & Sons, Ltd., 2014.

encontrar su trayectoria al receptor. Estas trayectorias también generan pérdidas y fases diferentes a las presentadas en LOS. Otra manera en que las ondas electromagnéticas se propagan es la difracción. La difracción ocurre cuando la onda golpea una superficie con irregularidades, como bordes afilados. Finalmente, la dispersión ocurre cuando hay un gran número de objetos más pequeños que la longitud de onda entre el transmisor y el receptor. Al atravesar estos objetos, la onda se dispersa y muchas copias de la señal viajan en diferentes direcciones. Existen otros fenómenos como la absorción y la refracción⁷.

1.6.1. Multitrayecto y desvanecimiento

Como se mencionó anteriormente, los canales inalámbricos se caracterizan por poseer diferentes trayectorias de propagación entre los transmisores y receptores, como resultado de las reflexiones causadas por obstáculos. Al viajar por diferentes trayectorias, diferentes versiones de la misma señal transmitida pueden llegar al transmisor simultáneamente. Este fenómeno es conocido como *multitrayectoria*.

En el lado receptor, las señales se pueden sumar de dos maneras. Si los picos de las señales que llegan al receptor coinciden, entonces la señal resultante es una versión más fuerte; en cambio, si los picos de las señales son opuestos, la señal se cancela o se reduce en potencia. El primer caso es conocido como *interferencia constructiva*, y el segundo, *interferencia destructiva*. Este último puede producir caída de la potencia de la señal a un nivel muy bajo, en cuyo caso se crea una situación de *desvanecimiento*.

Dado que en el receptor se realiza una combinación lineal de estas secuencias, la señal resultante es esencialmente una convolución de la señal de entrada y la respuesta impulso del canal⁸. En el dominio de la frecuencia, la respuesta frecuencial del canal presenta diferentes patrones de respuesta para diferentes valores de frecuencia. Esto se conoce como desvanecimiento selectivo en frecuencia.

En redes inalámbricas móviles, las señales pueden experimentar desvanecimiento significativo en el tiempo, que usualmente es una función de la frecuencia de Doppler. Este tipo de desvanecimiento se conoce como desvanecimiento no selectivo en frecuencia o desvanecimiento plano. En el desvanecimiento plano, la estructura multitrayecto del canal es tal que la respuesta en frecuencia de la señal se mantiene igual en el receptor, pero la amplitud de la señal recibida cambia en el tiempo debido a los cambios en la ganancia del canal causada por el multitrayecto. En los sistemas de comunicaciones inalámbricos la degradación de la calidad de la señal es causada principalmente por *canales de desvanecimiento Rayleigh*.

⁷H. Jafarkhani, *Space-Time Coding. Theory and Practice*. Cambridge University Press, 2005.

⁸H. Zarrinkoub, *Understanding LTE with MATLAB: from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation*. John Wiley & Sons, Ltd., 2014.

1.6.2. Desvanecimiento plano

Si el canal tiene una ganancia constante y respuesta en fase lineal sobre un ancho de banda que es más grande que el ancho de banda de la señal transmitida, entonces la señal recibida sufrirá *desvanecimiento plano*. Este tipo de desvanecimiento se caracteriza por que el espectro de la señal transmitida permanece constante en el receptor, pero la amplitud de la señal cambia con el tiempo debido a los cambios en la ganancia del canal producido por el multitrayecto⁹.

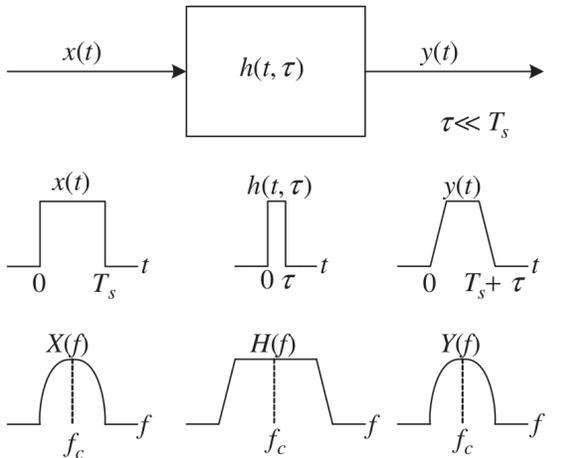


Figura 1.5: Desvanecimiento plano. Imagen de [7]

La figura 1.5 muestra las características del desvanecimiento plano en canales multitrayecto. Se puede apreciar que el ancho de banda del canal es más grande que el ancho de banda de la señal. Un ancho de banda más angosto implica que el periodo de símbolo T_s es mayor que el retardo de propagación τ del canal multitrayecto $h(t, \tau)$. Mientras T_s sea mayor que τ , el símbolo actual no afecta tanto el símbolo siguiente durante su periodo de símbolo, lo que hace que la interferencia intersimbólica no sea significativa¹⁰.

1.6.3. Desvanecimiento selectivo en frecuencia

Si el canal posee una respuesta en fase lineal y de ganancia constante sobre un ancho de banda que es menor que el ancho de banda de la señal transmitida, entonces el canal produce *desvanecimiento selectivo en frecuencia* en la señal recibida. Bajo tales condiciones la respuesta impulso del canal tiene un retardo de propagación multitrayecto

⁹T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2002.

¹⁰Y. S. Cho, J. Kin, W. Y. Yang y col., *MIMO-OFDM Wireless Communications With MATLAB®*. John Wiley & Sons, Ltd., 2010.

que es más grande que el recíproco del ancho de banda de la onda de la señal transmitida. Esto produce que la señal recibida incluya múltiples versiones de la onda transmitida, que está atenuada y retrasado en tiempo, y por lo tanto la señal recibida se distorsiona.

En canales selectivos en frecuencia, el espectro de la señal tiene un ancho de banda que es mayor que el ancho de banda coherente del canal. Así, visto desde el dominio de la frecuencia, ciertos componentes de la señal recibida tienen ganancias diferentes para diferentes componentes frecuenciales: el canal se convierte selectivo en frecuencia. Este tipo de desvanecimiento es causado por retardos de multitrayecto, los cuales se acercan o exceden el periodo del símbolo transmitido¹¹.

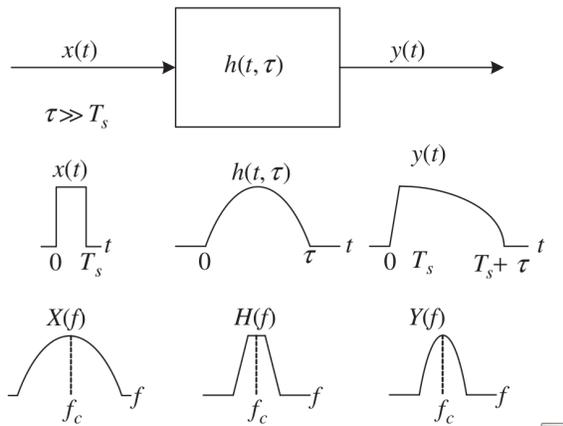


Figura 1.6: Desvanecimiento selectivo en frecuencia. Imagen de [7]

En la figura 1.6 aparece el comportamiento del desvanecimiento selectivo en frecuencia. Puede observarse que el ancho de banda del canal multitrayecto es menor que el ancho de banda de la señal. Debido a la corta duración del periodo de símbolo comparada con el retardo de propagación, múltiples copias retardadas de la señal transmitida se superponen sobre el siguiente símbolo de manera significativa, lo que conduce a interferencia intersimbólica¹².

1.6.4. Canal de desvanecimiento Rayleigh

En canales de sistemas inalámbricos, la distribución de Rayleigh se usa comúnmente para describir la naturaleza variante en el tiempo de la envolvente de una señal recibida con desvanecimiento plano, o la envolvente de un componente multitrayecto

¹¹T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2002.

¹²Y. S. Cho, J. Kin, W. Y. Yang y col., *MIMO-OFDM Wireless Communications With MATLAB®*. John Wiley & Sons, Ltd., 2010.

individual¹³. Para una señal de banda angosta $r(t)$ se puede expresar como¹⁴

$$r(t) = a(t)e^{-j(\omega_c t + \theta(t))} \quad (1.9)$$

Donde $a(t)$ es la envolvente de la señal variante en el tiempo, que obedece la distribución de Rayleigh. θ es la fase variante en el tiempo, que está uniformemente distribuida desde 0 a 2π . Las componente en fase y en cuadratura son números aleatorios gaussianos con media cero y varianza. Por lo tanto la función de probabilidad, *probability density function* (PDF) de $a(t)$ es:

$$f(a) = \frac{a}{\sigma^2} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}} \quad (1.10)$$

La PDF de la relación señal a ruido, *Signal to Noise Ratio* (SNR), recibida s , que es proporcional al cuadrado de la envolvente de la señal, siguiendo una distribución exponencial, se puede escribir como:

$$f(s) = \frac{1}{\rho} e^{-\frac{s}{\rho}} \quad (1.11)$$

¹³T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2002.

¹⁴H. Wang, L. P. Kondi, A. Luthra y col., *4G Wireless Video Communications*. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.

Capítulo 2

Codificación de video

2.1. Introducción

En la actualidad, concebir internet sin servicios de video es inimaginable. Años atrás pensar en una transmisión de video en tiempo real a través de internet era tecnológicamente muy complejo, y si esa transmisión era posible no era muy confiable. Actualmente la capacidad computacional de los equipos ha aumentado significativamente. Eso ha contribuido a que se puedan desarrollar técnicas de compresión de video más eficientes y de ese modo mejorar los servicios de video a través de sistemas de comunicaciones inalámbricos.

En los últimos años se han propuesto e investigado muchas técnicas diferentes sobre codificación de video. Cientos de artículos investigativos han sido publicados cada año describiendo las nuevas técnicas innovadoras de compresión. En contraste con esta gran variedad de innovaciones, las aplicaciones de la codificación de video comerciales tienden a emplear un número limitado de técnicas estandarizadas para la compresión de video. Los formatos de compresión de video estandarizados tienen un gran número de potenciales beneficios comparado con los no estandarizados¹:

- Los estándares simplifican la interoperabilidad entre los codificadores y los decodificadores de diferentes fabricantes.
- Los estándares hacen posibles que plataformas incorporen videos, en un gran número de aplicaciones cómo los codificadores de video, codificadores de audio, protocolos de transporte, seguridad y administración de derechos de autor.

¹I. E. Richardson, *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. Wiley, 2010.

De esta manera es claro que los estándares Advanced Video Coding (AVC) y High Efficiency Video Coding (HEVC) son parte fundamental de la forma en que hoy concebimos el intercambio de videos a través de internet. La nueva versión de Hyper Text Markup Language (HTML5) soporta la etiqueta `<video></video>`. Esta permite la inserción de video dentro de páginas web de forma fácil y dinámica; además esta etiqueta soporta dos formatos de compresión: uno de ellos AVC, y en los años por venir soportará HEVC. Esta interoperabilidad hace que la construcción de aplicaciones y contenido multiplataforma sea más sencilla. De igual manera, este cambio obliga a que los estándares de compresión evolucionen constantemente. Un ejemplo es el estándar VP8² desarrollado por Google como contraparte del AVC.

A continuación se expondrán los dos estándares que se han empleado para el trabajo de investigación expuesto en este libro.

2.2. ¿Qué es H.264/AVC?

H.264/AVC es un estándar de codificación de video desarrollado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T) y la Organización Internacional de estandarización/Comisión Electrotécnica Internacional (ISO/IEC) que define el formato o sintaxis del video comprimido y el método de decodificación. Este estándar define un esquema general de codificación mas no una forma explícita de hacerlo, la implementación del codificador está a cargo del desarrollador o fabricante. Cabe aclarar que el video codificado debe cumplir con la sintaxis establecida por el estándar para que posteriormente el decodificador pueda reconocer la cadena de bits de entrada como una secuencia de video válida H.264³.

2.3. Proceso de codificación/decodificación

2.3.1. Codificación

El codificador de video H.264 cuenta con tres etapas principales: predicción, transformación y proceso de codificación en cadena de bits. Después de todas estas etapas el resultado es una cadena de bits de video codificado en H.264.

El decodificador AVC implementa el proceso contrario al momento de reconstruir el video original. El video es representado en forma comprimida de tal manera que su

² *Vp8 data format and decoding guide*, Internet Engineering Task Force (IETF), 2011.

³ I. E. Richardson, *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. Wiley, 2010.

reconstrucción no es idéntica a la original debido a que H.264 es un formato de compresión con pérdidas. La calidad de los cuadros puede verse afectada al momento de la compresión.

Un cuadro que va a ser codificado es procesado por un codificador compatible con AVC. Así como se codifica y se envía el cuadro comprimido como parte de una cadena de bits que representa el video o archivo comprimido, el codificador reconstruye el cuadro a partir de esa versión comprimida y lo almacena en un *buffer*, el cual será usado para la codificación de futuros cuadros. De la misma manera se cumple en el decodificador donde un decodificador compatible con AVC al momento de reconstruir un cuadro. Este es almacenado en un *buffer* para luego ayudar a la decodificación de futuros cuadros.

Predicción

En esta sección del codificador el objetivo principal es eliminar tanto como sea posible la redundancia presentada en el video. Para ello se emplean la predicción intracuadro e intercuadro: la primera trata de predecir el comportamiento de los macrobloques dentro del cuadro de video y la segunda trata de predecir el comportamiento de los macro-bloques a través de los cuadros previamente codificados.

El proceso de predicción se puede observar de manera general en la Figura 2.1 y es explicado de forma abstracta a continuación:

- Se toman cada uno de los cuadros del video y se dividen en macro bloques de 16x16 muestras.
- Se realiza la predicción intracuadro e intercuadro y se forma el macro bloque de predicción.
- Se efectua la comparación entre el marcobloque original y el macrobloque predicho y se forma un macro bloque residual, el cual es de menor tamaño que el originalmente tomado.

Realizar estas predicciones hace que no se deba codificar información reduntante y por ende la compresión sea más eficiente. Claro está que debido a este procedimiento se presentan pérdidas en los cuadros originales que son poco perceptibles pero que en algún momento dado pueden llegar a ser problemáticas en video de alto movimiento.

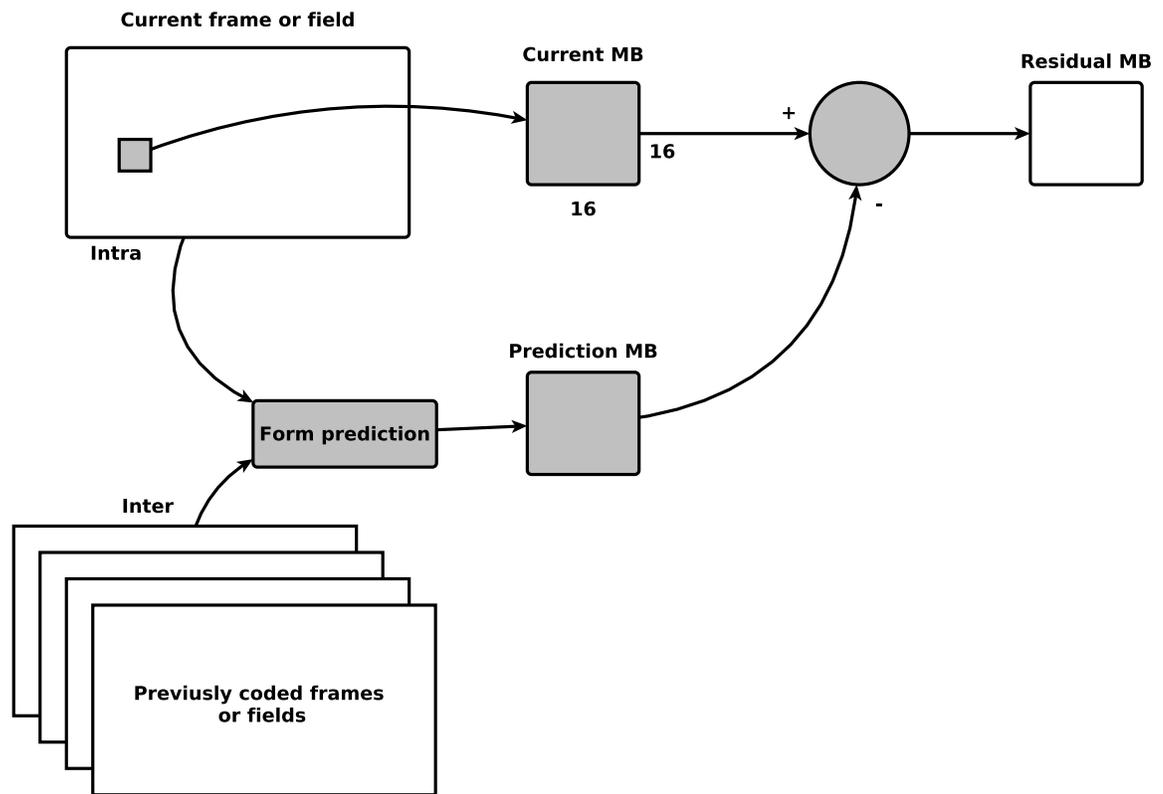


Figura 2.1: Predicción [9]

Transformación y cuantización

En esta etapa las muestras del macrobloque de predicción son transformadas usando la transformación de enteros de 4x4 o 8x8. Esta transformación es similar a la transformación de coseno discreto. El resultado de esta transformación son unos coeficientes, cada uno con un valor de patrones estándar⁴. Luego de obtener los coeficientes es momento de realizar la cuantización, donde cada coeficiente es dividido por un valor entero llamado Parámetro de Cuantización (QP) y posteriormente ese resultado es aproximado al valor entero más cercano. Generalmente muchos de esos valores son cero. El hecho de que sean cero indica un nivel de compresión muy alto. Una de las desventajas de la cuantización es la pérdida de precisión, la cual se traduce en pérdida de calidad. La elección de un QP determina el nivel de compresión y calidad del macrobloque codificado: un valor alto aumenta el nivel de compresión pero disminuye la calidad y un valor muy bajo aumenta la calidad y disminuye la compresión. La elección de este parámetro es muy importante al momento de codificar

⁴I. E. Richardson, *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. Wiley, 2010.

el video.

Codificación en cadena de bits

El proceso de codificación produce un número de parámetros que deben ser transformados para formar la cadena de bits del video comprimido. Dentro de esos valores se encuentran los coeficientes cuantizados encontrados en el punto anterior, además de cierta información sobre la estructura del video y las herramientas utilizadas en su codificación. Estos parámetros deben ser codificados en binario por medio de codificación de tamaño variable y de codificación aritmética, para poder representar de la forma comprimida toda la información detallada anteriormente⁵.

2.3.2. Decodificación

El decodificador es el encargado de interpretar y reconstruir la cadena de bits recibida proveniente del codificador. La calidad de la reconstrucción del video depende en gran medida de la integridad de la información recibida, por ello es importante desarrollar técnicas que permitan blindar la información comprimida, ya que perder secciones cortas de esa información se traduce en grandes pérdidas al momento de su reconstrucción.

Decodificación de la cadena de bits

La decodificación de la cadena de bits es el proceso encargado de tomar la información recibida en forma binaria dividida en fragmentos de información, e interpreta el contenido dentro de cada uno de estas unidades de información. Estos parámetros deben ser decodificados de tal manera que en el proceso de escalado y cuantización se puedan obtener valores parecidos a los transformados en el codificador.

Escalado y transformación inversa

Los valores de los coeficientes cuantizados son recibidos. Cada uno de estos valores es escalado a un valor aproximado al original, multiplicando a todos ellos por el QP. De esta manera se realiza la transformación inversa a la realizada en el codificador y se obtienen los macrobloques decodificados.

⁵I. E. Richardson, *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. Wiley, 2010.

Reconstrucción

El decodificador toma los macrobloques decodificados y reconstruye los cuadros del video de acuerdo a las predicciones intra e inter cuadro. En la Figura 2.2 se puede observar este proceso.

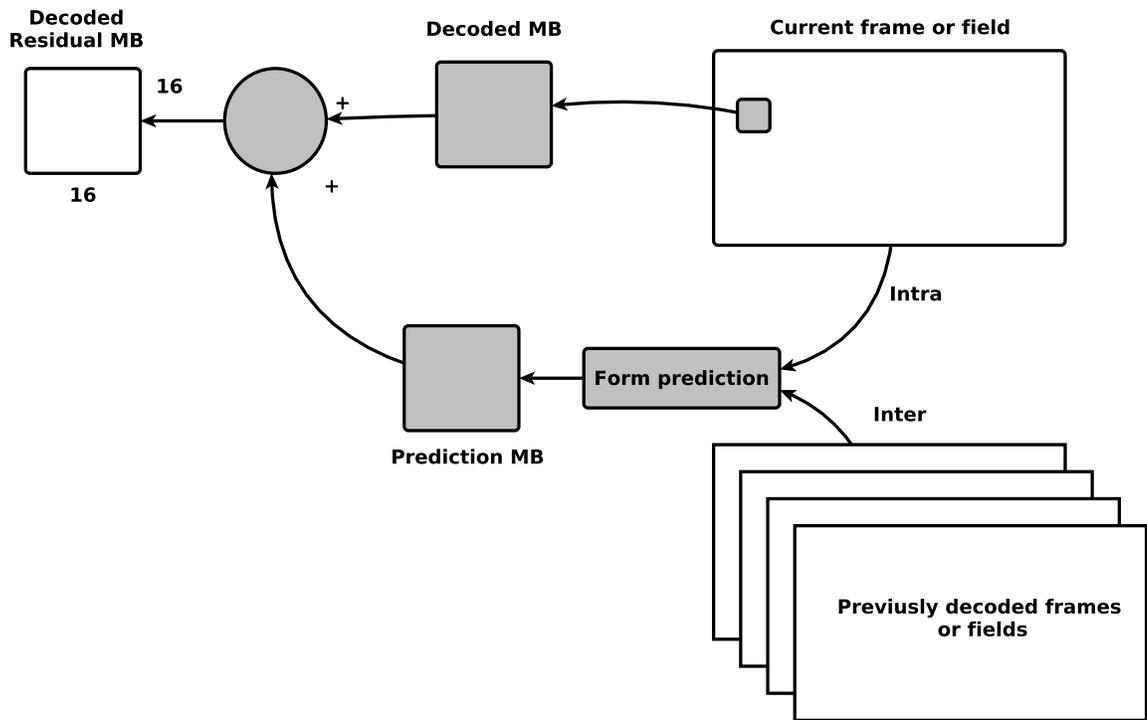


Figura 2.2: Reconstrucción [9]

2.4. Sintaxis de alto nivel

Cuando un video es codificado en H.264/AVC el resultado es una cadena de bits de video comprimido. Para que el decodificador pueda reconstruir el video original es necesario que esa cadena de bits tenga una estructura ordenada tal que permita identificar que tipo de información se encuentra contenida en cada sección de la cadena. Por ello el estándar provee una sintaxis de alto nivel que permite caracterizar la cadena de bits de forma clara. Esta sintaxis separa la cadena de bits en unidades Network Abstraction Layer (NAL). En H.264 es posible tener 32 tipos de estas unidades algunas son Video Coding Layer (VCL). En la tabla 2.1 podemos observar algunas de ellas.

Unidad NAL	Descripción	VCL
Slice codificado, non-IDR	Un típico slice codificado	Sí
Slice codificado partición de datos A	Parte de datos fraccionados de un slice	Sí
Slice codificado partición de datos B	Parte de datos fraccionados de un slice	Sí
Slice codificado partición de datos C	Parte de datos fraccionados de un slice	Sí
Slice codificado, IDR	Parte de la unidad de acceso al inicio de una secuencia de video codificado	Sí
SEI	Información de mejora suplementaria	No
SPS	Conjunto de secuencias de parámetros (uno por secuencia)	No
PPS	Conjunto de parámetros de imagen	No
Delimitador de unidad de acceso	Indica el tipo de slice en la siguiente imagen codificada (opcional)	No
Fin de secuencia	Indica que la siguiente unidad de acceso es IDR (opcional)	No
Fin de cadena	Indica del fin de la cadena de bits codificados (opcional)	No
Relleno	Bytes de relleno (opcional)	No

Cuadro 2.1: Unidades NAL presentes en H.264/AVC **h264/AVC**

2.5. Modos de empaquetamiento RTP para H.264

Los modos de empaquetamiento Real Time Protocol (RTP) descritos por la Internet Engeneering Task Force (IETF) en su estándar⁶ para video H.264 se describen a continuación:

- Paquete de unidad NAL individual: Esta forma de empaquetado consiste en que dentro de cada paquete solamente exista una unidad NAL. Este tipo de empaquetamiento es utilizado para comunicaciones que requieren baja latencia en su transmisión, como lo es la transmisión de video en tiempo real. El paquete se encuentra conformado por un encabezado que no es más que la copia del encabezado de la unidad NAL, además de la unidad entera.
- Paquete de agregación: Consiste principalmente en construir paquetes que contengan más de una unidad NAL y que no se realice la fragmentación de

⁶*Rtp payload format for h.264 video*, Internet Engeneering Task Force (IETF), 2011.

ninguna de las unidades. Este tipo de empaquetamiento es utilizado en aplicaciones donde es posible emplear paquetes grandes de diferente tamaño.

- Paquete de unidad fragmentada: Los paquetes son formados por múltiples unidades NAL y éstas pueden estar fragmentadas. Aquí hay que tener especial precaución al momento de realizar la decodificación: es utilizado en aplicaciones que permiten paquetes grandes de tamaño fijo.

2.6. Rendimiento del codificador H.264

Probablemente la mayor ventaja del codificador AVC sobre los estándares previos es su capacidad de compresión. Comparado con estándares como MPEG-2 y MPEG-4 Visual, H.264 puede proveer:

- Una menor tasa de bits para la misma calidad de imagen que los codificadores anteriores.
- Mejor calidad de imagen a una tasa de bits igual que los anteriores codificadores.

Cómo ejemplo, un DVD de una sola capa puede almacenar una película de alrededor de dos horas en formato MPEG-2. Si se usa AVC, puede ser posible almacenar cuatro horas de película en el mismo DVD de una sola capa o se puede almacenar la misma película de dos horas pero con mejor resolución⁷.

2.7. ¿Qué es H.265/HEVC?

El estándar de codificación de video HEVC es el proyecto conjunto del ITU-T Video Coding Experts Group (VCEG) y ISO/IEC Moving Picture Experts Group (MPEG), trabajando en conjunto conformando el Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC). HEVC ha sido diseñado para cumplir todas las aplicaciones existentes del estándar AVC y particularmente centrarse en dos problemas principales: incrementar la resolución del video y aumentar el uso de arquitecturas paralelas para el procesamiento. Como ha sido el caso de todos los estándares de codificación de video de la ITU-T y ISO/IEC, en HEVC solamente la cadena de bits y su sintaxis están estandarizadas⁸. La

⁷I. E. Richardson, *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. Wiley, 2010.

⁸W.-J. H. Gary J. Sullivan Jens-Rainer Ohm y T. Wiegand, «Overview of the high efficiency video coding (hevc) standard», *IEEE Transactions On Circuits And Systems For Video Technology*, Vol. 22, NO. 12, December 2012.

primera versión del estándar fue publicada en el 2013 y actualmente la versión vigente es la publicada en abril de 2015.

2.8. Diseño y características del codificador HEVC

El estándar de codificación HEVC fue diseñado para alcanzar múltiples objetivos, incluyendo eficiencia en la codificación, facilidad para la integración con sistemas de transporte y que su implementación sea sobre arquitecturas de procesamiento paralelos. A continuación se presentan los elementos principales que hacen que este estándar cumpla con sus objetivos.

2.8.1. Capa de codificación de video

La capa de codificación de video del estándar HEVC emplea el mismo esquema híbrido utilizado desde el estándar H.261. Un algoritmo de codificación produce una cadena de bits de video codificado con HEVC, este proceso es descrito brevemente a continuación:

- Cada cuadro de video es dividido en regiones de tamaño fijo. El tamaño de estos bloques es definido con el codificador.
- El primer cuadro de una secuencia de video es codificado utilizando predicción intracuadro, la cual utiliza predicción de datos de forma espacial entre región y región dentro del mismo cuadro. La característica principal de esta predicción es que no depende de ningún otro cuadro dentro de la secuencia.
- Los demás cuadros son codificados empleando predicción intercuadro la cual emplea predicción entre cuadros codificados anterior o posteriormente.
- El proceso de predicción intercuadro consiste en tomar datos de movimiento del cuadro previo al seleccionado para extraer su vector de movimiento que puede ser aplicado para predecir las muestras de cada bloque del cuadro presente. De esta manera la información redundante existente entre cuadros es eliminada.
- El codificador y el decodificador generan predicciones intercuadro idénticas empleando compensación de movimiento tomando los vectores de movimiento extraídos en el paso anterior.
- La diferencia entre el cuadro original y su predicción intra o inter cuadro es transformada utilizando una transformación especial lineal, la cual entrega unos coeficientes que posteriormente serán escalizados, cuantizados, codificados por un codificador de entropía y transmitidos junto a la información de predicción.

2.8.2. Arquitectura de la sintaxis de alto nivel

La sintaxis de alto nivel empleada en el estándar AVC es mantenida en su mayor parte por HEVC incluyendo las siguientes características.

- Estructura del conjunto de parámetros: El conjunto de parámetros contienen información que pueden ser compartidas por el decodificador en regiones diferentes dentro del video decodificado. La estructura de estos parámetros provee un mecanismo robusto para transportar datos que son esenciales para el proceso de decodificación. El concepto de secuencia y parámetros de imagen de AVC han aumentado por un nuevo parámetro llamado Video Parameter Set (VPS).
- Estructura de sintaxis de unidad NAL: Cada estructura de sintaxis se encuentra dentro de un paquete de datos lógicos llamado NAL. Si se conocen los dos primeros bytes del encabezado de una unidad NAL se pueden conocer el propósito de esa unidad dentro de la cadena de bits de video codificado.
- *Slices*: Un *slice* es una estructura de datos que puede ser decodificada independientemente de otros *slices* del mismo cuadro, en términos de codificador de entropía, predicción de señal y reconstrucción de señal residual. Un *slice* puede ser un cuadro entero o una porción de este. Uno de los principales propósitos es la resincronización ante la pérdida de paquetes.
- Metadatos Supplemental enhancement information (SEI) y Video Usability Information (VUI): La sintaxis incluye soporte para varios tipos de metadatos conocidos como SEI y vui. Estos datos proveen información sobre el tiempo de los cuadros de video, la interpretación correcta del espacio de color utilizado en la señal de video, y demás información del video.

2.8.3. Sintaxis de la decodificación paralela

Cuatro nuevas características han sido añadidas al estándar HEVC para permitir la capacidad de procesamiento paralelo o la capacidad de modificar la estructura de un *slice* con el propósito de mejorar el empaquetamiento. A continuación se describen estas nuevas características:

- *Tiles*: La opción de fragmentar un cuadro en múltiples regiones regulares llamadas *tiles* ha sido especificado en el estándar HEVC. El motivo principal de *tiles* es incrementar la capacidad de procesamiento paralelo.

- Wavefront Parallel processing (WPP): El procesamiento WPP es habilitado. Un *slice* es dividido en filas de Coding tree units (CTUs). La primera fila es procesada de manera ordinaria, la segunda fila puede ser procesada luego de que dos CTUs de la primera fila sean procesadas y así sucesivamente. El contexto de un codificador de entropía en el cual cada fila puede ser inferida de las filas anteriores mediante un retraso de dos CTUs provee un alto nivel de paralelismo.
- Segmentos de *slice* dependientes: Una estructura llamada segmento de *slice* dependiente permite que datos asociados con un WPP o *tile* en particular puede ser incluido en una unidad NAL en particular.

2.9. Sintaxis de alto nivel

La sintaxis de alto nivel empleada por HEVC contiene numerosos elementos de AVC. Las unidades NAL proveen la habilidad de mapear los datos de la capa de codificación de video a varios tipos de empaquetamiento en la capa de transporte, incluyendo RTP, ISO MP4, etc. Esta sintaxis provee una herramienta resistente a errores. Las unidades NAL se clasifican en VCL y no-VCL dependiendo de que tipo de información contiene dicha unidad. En el cuadro 2.2 es posible apreciar los distintos tipos de unidades NAL presentes en HEVC.

2.10. Modos de empaquetamiento RTP para H.265

Los modos de empaquetamiento RTP descritos por la IETF en su estándar⁹ para video H.265 se describen a continuación:

- Paquete de unidad NAL individual: Ésta forma de empaquetado consiste en que dentro de cada paquete solamente exista una unidad NAL. Este tipo de empaquetamiento es utilizado para comunicaciones que requieren baja latencia en su transmisión, como lo es la transmisión de video en tiempo real. El paquete se encuentra conformado por un encabezado que es la copia del encabezado de la unidad NAL además de la unidad entera.
- Paquete de agregación: Consiste principalmente en formar paquetes que contengan más de una unidad NAL y que no se realice la fragmentación de ninguna de las unidades. Este tipo de empaquetamiento es utilizado en aplicaciones donde es posible emplear paquetes grandes de diferente tamaño.

⁹ *Rtp payload format for h.265 video*, Internet Engineering Task Force (IETF), 2015.

Tipo	Descripción	VCL
0, 1	Segmento de slice de un cuadro ordinario	Sí
2, 3	Segmento de slice de un cuadro TSA	Sí
4, 5	Segmento de slice de un cuadro STSA	Sí
6, 7	Segmento de slice de un cuadro RADL	Sí
8,9	Segmento de slice de un cuadro RASL	Sí
10-15	Reservados para uso futuro	Sí
16-18	Segmento de slice de cuadro BLA	Sí
19, 20	Segmento de slice de cuadro IDR	Sí
21	Segmento de slice de cuadro CRA	Sí
22-31	Reservados para uso futuro	Sí
32	Conjunto de parámetros de video VPS	No
33	Conjunto de parámetros de secuencia SPS	No
34	Conjunto de parámetros de cuadro PPS	No
35	Delimitador de unidad de acceso	No
36	Fin de secuencia	No
37	Fin de la cadena de bits	No
38	Datos de relleno	No
39, 40	Mensajes SEI	No
41-47	Reservados para uso futuro	No
48-63	Sin especificar, disponibles para uso del sistema	No

Cuadro 2.2: Unidades NAL presentes en H.265/HEVC [12].

- Paquete de unidad fragmentada: Los paquetes son formados por múltiples unidades NAL y éstas pueden estar fragmentadas. Aquí hay que tener especial precaución al momento de realizar la decodificación: es utilizado en aplicaciones que permiten paquetes grandes de tamaño fijo.

Capítulo 3

Modelo tensorial PARAFAC

3.1. Introducción

El concepto de tensor tiene múltiples interpretaciones de acuerdo al área del conocimiento de que sea objeto. No obstante, una definición intuitiva común a todas las interpretaciones es la de que un tensor representa un arreglo multidimensional ordenado de valores numéricos. Los tensores han sido utilizados ampliamente en diferentes campos del conocimiento para modelar fenómenos descritos por múltiples variables. Por ejemplo, en el campo de la química, una medida típica del espectro de las emisiones de fluorescencia en diferentes longitudes de ondas para diferentes muestras, el tiempo de vida de fluorescencia medido en diferentes longitudes de onda de emisión y excitación o cualquier tipo de espectro medido cromatográficamente para diferentes muestras.

Tradicionalmente, en los sistemas de comunicaciones inalámbricos que emplean múltiples antenas en ambos extremos del enlace MIMO, las señales se han modelado como arreglos de dos dimensiones (matrices). Las dimensiones normalmente utilizadas son espacio y tiempo. Aquí, mostramos cómo interpretar una señal de múltiples dominios como un tensor e introducimos la descomposición tensorial *análisis de factores paralelos*, *Parallel Factor Analysis* (PARAFAC).

En este capítulo presentamos el modelo tensorial para un sistema MIMO híbrido en el que modelamos la señal recibida como un arreglo de tres dimensiones (tensor) de acuerdo al modelo de descomposición tensorial PARAFAC.

3.2. Teoría de tensores

3.2.1. Notación

A continuación se presenta la notación utilizada para esta sección.

El orden de un tensor es el número de dimensiones, también conocido como modo. Los escalares se notarán con letras minúsculas (a); los vectores (tensores de orden uno), en negrita y con letras minúsculas (\mathbf{a}); y las matrices (tensores de orden dos), en negrita y con letras mayúsculas (\mathbf{A}). Los tensores de más alto orden son notados con letras negritas de la fuente AMS Euler (\mathcal{X})

El i -ésimo elemento de un vector \mathbf{a} se denotará como a_i ; el elemento (i, j) de una matriz \mathbf{A} ; a_{ij} ; y el elemento (i, j, k) de un tensor de tercer orden \mathcal{X} , x_{ijk} . El n -ésimo elemento en una secuencia se notará con un superíndice entre paréntesis ($\mathbf{A}^{(n)}$).

3.2.2. Definición

La definición de tensor varía dependiendo del campo de estudio. En análisis de datos, campo del álgebra lineal, un tensor es definido como una entidad matemática que goza de propiedades multilineales después de un cambio de sistema de coordenadas¹. Aquí, un tensor de N -ésimo orden se interpreta como un arreglo que exhibe independencia lineal con respecto a N espacios vectoriales, y cuyos elementos son ubicados a través de los índices de N .

Para los fines presentados en esta tesis, un tensor se define como una estructura matemática abstracta que representa datos en un arreglo multidimensional. Así, un vector puede definirse como un tensor de rango 1; una matriz, un tensor de rango dos. Un tensor de rango 3 puede interpretarse intuitivamente como un objeto tridimensional. Los tensores de rango 3 son el objeto de estudio de esta sección.

3.2.3. Representaciones extendidas de un tensor

Un tensor de orden 3 puede representarse geoméricamente como un paralelepípedo. Una representación alternativa de un tensor es una concatenación de matrices. Particularmente, para un tensor de tercer orden existen tres maneras de representarlo. Cada una de estas matrices se denominan *slices*.

¹P. Comon, «Tensor decompositions: state of the art and applications», *Mathematics in Signal Processing*, vol. V, 2001.

Los *slices* son secciones de dos dimensiones de un tensor, definidas al mantener fijos solo dos índices del tensor. La figura 3.1 muestra las caras horizontal, lateral y frontal de un tensor de tercer orden \mathbf{X} , denotadas por $\mathbf{X}_{i::}$, $\mathbf{X}_{:j}$ y $\mathbf{X}_{::k}$. Estas representaciones se llaman *representaciones extendidas*.

Definición 1 (representaciones extendidas). *El tensor de tercer orden $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{I \times J \times K}$ tiene tres representaciones matriciales \mathbf{X}_1 , \mathbf{X}_2 y \mathbf{X}_3 como sigue:*

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} X_{1::} \\ \vdots \\ X_{I::} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{I \times J \times K}, \quad \mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} X_{:1} \\ \vdots \\ X_{:J} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{J \times K \times I}, \quad \text{y} \quad \mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} X_{::1} \\ \vdots \\ X_{::K} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{K \times I \times J}$$

Donde $X_{i::} \in \mathbb{C}^{J \times K}$ es el i -ésimo slice considerando el primer dominio fijo, $X_{:j} \in \mathbb{C}^{K \times I}$ es el j -ésimo slice en el segundo dominio y $X_{::k} \in \mathbb{C}^{I \times J}$ es el k -ésimo slice en el tercer dominio.

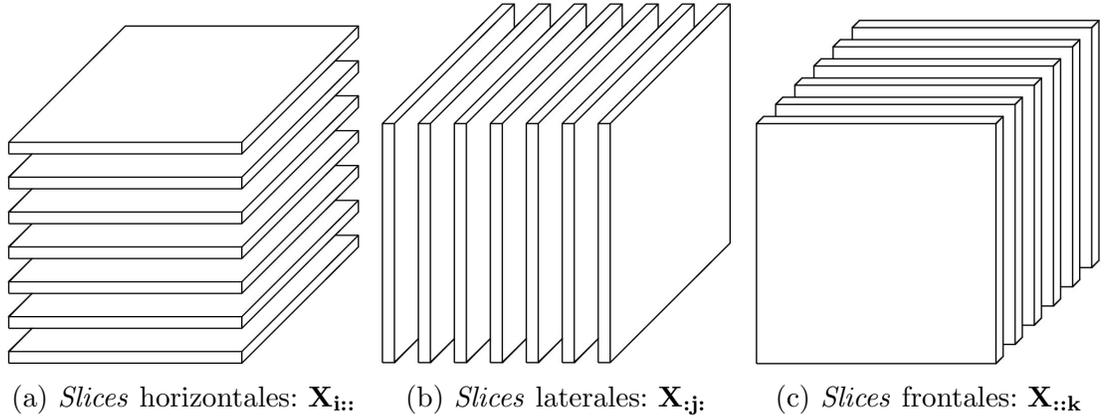


Figura 3.1: *Slices* de un tensor de tercer orden. Imagen de [15]

3.2.4. Tensores de rango uno

Para la definición *tensores de rango uno* es necesario presentar primero la definición de *producto exterior*. El producto exterior entre dos vectores \mathbf{u} y \mathbf{v} denotado $\mathbf{u} \circ \mathbf{v}$ equivale a la multiplicación matricial $\mathbf{u}\mathbf{v}^T$. Por ejemplo:

$$\mathbf{u} \circ \mathbf{v} = \mathbf{u}\mathbf{v}^T = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1v_1 & u_1v_2 & u_1v_3 \\ u_2v_1 & u_2v_2 & u_2v_3 \\ u_3v_1 & u_3v_2 & u_3v_3 \\ u_4v_1 & u_4v_2 & u_4v_3 \end{bmatrix}$$

Un tensor de N dimensiones $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ es de rango uno si se puede expresar como el producto exterior de N vectores. Es decir,

$$\mathbf{X} = \mathbf{a}^{(1)} \circ \mathbf{a}^{(2)} \circ \dots \circ \mathbf{a}^{(N)}$$

Definición 2 (tensor de rango 1). *Un tensor de rango 1 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ es un tensor que puede ser escrito como el producto exterior de N vectores $\mathbf{u}^{(1)} \in \mathbb{C}^{I_1}$, $\mathbf{u}^{(2)} \in \mathbb{C}^{I_2}$, \dots , $\mathbf{u}^{(N)} \in \mathbb{C}^{I_N}$. Esto es*

$$x_{i_1, i_2, \dots, i_N} = u_{i_1}^{(1)} u_{i_2}^{(2)} \dots u_{i_N}^{(N)}$$

Donde $u^{(n)}$ son los vectores componente de \mathbf{X} .

La figura 3.2 ilustra el tensor de rango uno $\mathbf{X} = \mathbf{a} \circ \mathbf{b} \circ \mathbf{c}$.

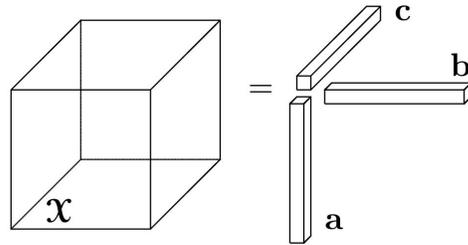


Figura 3.2: Tensor de tercer orden de rango uno $\mathbf{X} = \mathbf{a} \circ \mathbf{b} \circ \mathbf{c}$. Imagen de [15]

3.2.5. Rango de un tensor

El rango de un tensor \mathbf{X} define el menor número de tensores componente de rango 1 que generan \mathbf{X} como su suma.

Definición 3 (rango de un tensor). *El rango de un tensor de tercer orden \mathbf{X} , denotado por $\text{rank}(\mathbf{X})$, es el número mínimo de tensores de rango 1 necesarios para expresar \mathbf{X} como una combinación lineal de tensores de rango 1. Así, un tensor de rango R puede expresarse como*

$$\mathbf{X} = \sum_{r=1}^R \mathbf{X}^{(r)} = \sum_{r=1}^R \mathbf{a}^{(r)} \circ \mathbf{b}^{(r)} \circ \mathbf{c}^{(r)}$$

Donde $\mathbf{X}^{(r)} = \mathbf{a}^{(r)} \circ \mathbf{b}^{(r)} \circ \mathbf{c}^{(r)}$ es un tensor de rango 1 de dimensiones $I \times J \times K$ con $\mathbf{a}^{(r)} \in \mathbb{C}^I$, $\mathbf{b}^{(r)} \in \mathbb{C}^J$ y $\mathbf{c}^{(r)} \in \mathbb{C}^K$.

3.2.6. Productos matriciales

Dos de los productos más utilizados en las operaciones tensoriales son los producto *Khatri-Rao* y *Kronecker*.

El producto Khatri-Rao, que es equivalente a un producto Kronecker, en forma de columna, de dos matrices, fue planteado por Khatri y Rao².

El producto *Kronecker* de las matrices $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{I \times J}$ y $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{K \times L}$ se denota por $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$, que resulta en una matriz de tamaño $IK \times JL$.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \otimes \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} a_{11}\mathbf{B} & a_{12}\mathbf{B} & \cdots & a_{1J}\mathbf{B} \\ a_{21}\mathbf{B} & a_{22}\mathbf{B} & \cdots & a_{2J}\mathbf{B} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I1}\mathbf{B} & a_{I2}\mathbf{B} & \cdots & a_{IJ}\mathbf{B} \end{bmatrix} \\ &= [\mathbf{a}_1 \otimes \mathbf{b}_1 \quad \mathbf{a}_1 \otimes \mathbf{b}_2 \quad \mathbf{a}_1 \otimes \mathbf{b}_3 \quad \cdots \quad \mathbf{a}_J \otimes \mathbf{b}_{L-1} \quad \mathbf{a}_J \otimes \mathbf{b}_L] \end{aligned}$$

Definición 4 (Khatri-Rao product). *El producto Khatri-Rao, denotado por \diamond , de dos matrices $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{I \times K}$ y $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{J \times K}$ resulta en una matriz de tamaño $(IJ) \times K$ dada por*

$$\mathbf{A} \diamond \mathbf{B} = [\mathbf{a}_1 \otimes \mathbf{b}_1 \quad \mathbf{a}_2 \otimes \mathbf{b}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{a}_k \otimes \mathbf{b}_k]$$

3.3. Descomposición tensorial

La descomposición tensorial, también conocida como análisis de factores multidimensionales, es un área del algebra multidimensional que caracteriza un tensor como una combinación lineal de factores producto externos. La descomposición tensorial es útil en aplicaciones en la que se requiere identificar los factores o las variables involucradas en una *mezcla multilineal* de un conjunto de datos medidos³. Para los fines de este trabajo de grado, la descomposición tensorial de un conjunto de datos medidos separa la señal recibida de diferentes fuentes. Existen diferentes tipos de descomposición tensorial, sin embargo, en esta tesis se presenta únicamente la descomposición PARAFAC. La descomposición de tensores de tercer orden será el objeto de esta sección.

²C. Khatri y C. Rao, «Solutions to some functional equations and their applications to characterization of probability distributions», *Sankhya*, vol. 30, 1968.

³A. D. Almeida, «Tensor modeling and signal processing for wireless communication systems. networking and internet architecture», 2007, Université de Nice Sophia Antipolis.

3.3.1. Descomposición PARAFAC (Parallel Factor Analysis)

La descomposición PARAFAC, también conocida como descomposición canónica, *Canonical Decomposition* (CANDECOMP), fue desarrollada de forma independiente por Harshman y Carol y Chang en los años setenta. También es conocida como CP, *por descomposición CANDECOMP/PARAFAC*.

La descomposición PARAFAC factoriza un tensor en una suma de tensores componente de rango uno.

Definición 5 (descomposición PARAFAC). *Sea $\mathcal{X} \in \mathbb{C}^{I \times J \times K}$ un tensor de rango R . Entonces \mathcal{X} se puede descomponer como una suma de tensores de rango uno $\mathcal{X}^{(r)}$ como sigue:*

$$\mathcal{X} = \sum_{r=1}^R \mathcal{X}^{(r)} = \sum_{r=1}^R \mathbf{a}^{(r)} \circ \mathbf{b}^{(r)} \circ \mathbf{c}^{(r)}$$

Donde R es un entero positivo, y $\mathbf{a}^{(r)} \in \mathbb{C}^I$, $\mathbf{b}^{(r)} \in \mathbb{C}^J$ y $\mathbf{c}^{(r)} \in \mathbb{C}^K$, para $r = 1, \dots, R$.

En forma de elementos, puede escribirse como

$$x_{i,j,k} \approx \sum_{r=1}^R a_{i,r} b_{j,r} c_{k,r}, \quad \text{para } i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J \quad k = 1, \dots, K$$

La figura 3.3 ilustra la descomposición PARAFAC.

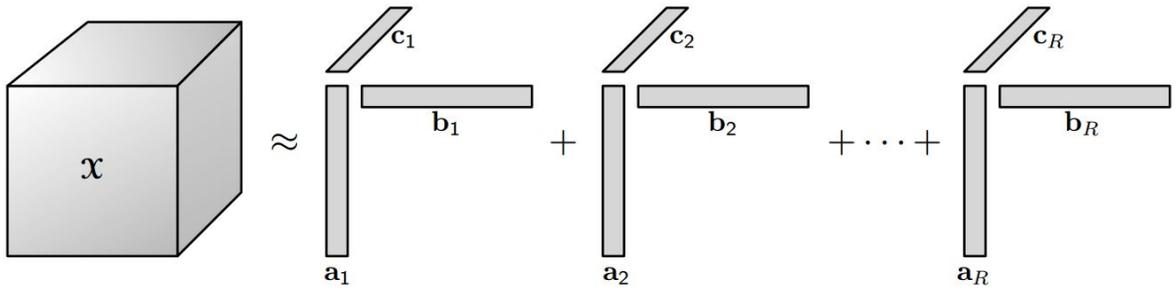


Figura 3.3: Descomposición PARAFAC de un tensor tridimensional. Imagen de [15]

Las *matrices factor* se refieren a la combinación de los vectores que forman los componentes de rango uno; es decir, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \cdots \ \mathbf{a}_R]$, y de igual manera para \mathbf{B} y \mathbf{C} .

La descomposición PARAFAC puede escribirse en forma matricial, de acuerdo a los

slices de cada representación extendida 1), de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_{(i::)} &= \mathbf{B}D_i(\mathbf{A})\mathbf{C}^T \\ \mathbf{X}_{(:,j)} &= \mathbf{C}D_j(\mathbf{B})\mathbf{A}^T \\ \mathbf{X}_{(:,k)} &= \mathbf{A}D_k(\mathbf{C})\mathbf{B}^T\end{aligned}$$

Donde $D_i(\mathbf{A})$ forma una matriz diagonal con la i -ésima fila de \mathbf{A} en su diagonal.

Las representaciones extendidas \mathbf{X}_1 , \mathbf{X}_2 y \mathbf{X}_3 pueden representarse concatenando los *slices* horizontales, laterales y frontales correspondientes de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_1 &= \begin{bmatrix} X_{1::} \\ X_{2::} \\ \vdots \\ X_{I::} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}D_1(\mathbf{A}) \\ \mathbf{B}D_2(\mathbf{A}) \\ \vdots \\ \mathbf{B}D_I(\mathbf{A}) \end{bmatrix} \mathbf{C}^T = (\mathbf{A} \diamond \mathbf{B})\mathbf{C}^T \\ \mathbf{X}_2 &= \begin{bmatrix} X_{:,1} \\ X_{:,2} \\ \vdots \\ X_{:,J} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}D_1(\mathbf{B}) \\ \mathbf{C}D_2(\mathbf{B}) \\ \vdots \\ \mathbf{C}D_J(\mathbf{B}) \end{bmatrix} \mathbf{A}^T = (\mathbf{B} \diamond \mathbf{C})\mathbf{A}^T \\ \mathbf{X}_3 &= \begin{bmatrix} X_{::1} \\ X_{::2} \\ \vdots \\ X_{::K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}D_1(\mathbf{C}) \\ \mathbf{A}D_2(\mathbf{C}) \\ \vdots \\ \mathbf{A}D_J(\mathbf{C}) \end{bmatrix} \mathbf{B}^T = (\mathbf{C} \diamond \mathbf{A})\mathbf{B}^T\end{aligned}$$

3.3.2. Unicidad

Una de las propiedades más importantes de la descomposición PARAFAC es la unicidad. La descomposición de tensores de alto orden es en ocasiones única; mientras que la descomposición matricial no lo es.

Sea $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{I \times J}$ una matriz de rango R . Entonces, la descomposición en factores de una matriz es:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{B}^T = \sum_{r=1}^R \mathbf{a}_r \circ \mathbf{b}_r$$

Si la descomposición de valores singulares, *Singular Value Decomposition* (SVD), de \mathbf{X} es $\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$, entonces podemos hacer $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}$ y $\mathbf{B} = \mathbf{V}$. Sin embargo, es igualmente

válido hacer $\mathbf{A} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{W}$ y $\mathbf{B} = \mathbf{V}\mathbf{W}$, donde \mathbf{W} es una matriz ortogonal de tamaño $R \times R$. En otras palabras, se pueden seleccionar dos conjuntos completamente diferentes de R matrices de rango uno para formar la matriz original⁴.

La unicidad significa que solo hay una posible combinación de tensores de rango uno que puede utilizarse para formar el tensor original, bajo ciertas condiciones, que se presentan a continuación. La prueba de unicidad formal más conocida es la presentada por Kruskal en [18] y está basado en un concepto fundamental, que es el *rango k* (*rango Kruskal*).

Definición 6 (rango k de una matriz). *El rango de $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{I \times J}$, denotado por $\text{rank}(\mathbf{A})$, es igual a r si y solo si \mathbf{A} contiene un conjunto de r columnas linealmente independientes, pero ningún conjunto de $r + 1$ columnas linealmente independientes. El rango Kruskal (o rango k) de \mathbf{A} es el número máximo k tal que cada conjunto de k columnas de \mathbf{A} es linealmente independiente. Nótese que $k_{\mathbf{A}} \leq \text{rank}(\mathbf{A}), \forall \mathbf{A}$.*

Definición 7 (matriz de permutación⁵). *Una matriz cuadrada P es una matriz de permutación si exactamente una entrada en cada fila y columna es igual a 1 y todas las demás entradas son 0. La multiplicación por tales matrices efectúa una permutación de las filas y las columnas de la matriz multiplicada. Por ejemplo:*

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Definición 8 (matriz diagonal⁶). *Una matriz $D = [d_{ij}]$ es diagonal si $d_{ij} = 0$ siempre que $j \neq i$.*

Definición 9 (matriz unidad). *La matriz identidad es una matriz diagonal en la cual los elementos de su diagonal principal son 1, y todas las demás entradas son 0.*

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

⁴T. G. Kolda y B. W. Bader, «Tensor decompositions and applications», *SIAM REVIEW*, vol. 51, 2009.

⁵R. A. Horn y C. R. Johnson, *Matrix Analysis*. Cambridge University Press, 2013.

⁶R. A. Horn y C. R. Johnson, *Matrix Analysis*. Cambridge University Press, 2013.

Teorema 1 (unicidad de PARAFAC⁷). *Considérese las matrices $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{I \times R}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{J \times R}$ y $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{K \times R}$ que componen un tensor $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{I \times J \times K}$ tal que*

$$\mathbf{X} = \sum_{r=1}^R \mathbf{a}^{(r)} \circ \mathbf{b}^{(r)} \circ \mathbf{c}^{(r)}.$$

Si

$$k_{\mathbf{A}} + k_{\mathbf{B}} + k_{\mathbf{C}} \leq 2R + 2$$

entonces \mathbf{A} , \mathbf{B} y \mathbf{C} son únicas, sin tener en cuenta la permutación y el escalamiento de las columnas, lo cual significa que

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A}\mathbf{\Pi}\mathbf{\Delta}_1, \quad \bar{\mathbf{B}} = \mathbf{B}\mathbf{\Pi}\mathbf{\Delta}_2, \quad \bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C}\mathbf{\Pi}\mathbf{\Delta}_3,$$

Donde $\mathbf{\Pi}$ es una matriz de permutación y $\mathbf{\Delta}_{1,2,3}$ son matrices diagonales que satisfacen la condición

$$\mathbf{\Delta}_1\mathbf{\Delta}_2\mathbf{\Delta}_3 = \mathbf{I}$$

3.4. Alternating Least Squares (ALS)

El algoritmo de mínimos cuadrados alternantes, *Alternating Least Squares* (ALS), estima las matrices componentes $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{I \times R}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{J \times R}$ y $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{K \times R}$ de un modelo PARAFAC. El algoritmo ALS estima cada matriz factor del modelo PARAFAC ajustando todas las matrices factor excepto la matriz en cuestión, lo que permite convertir un problema de optimización natural en varios problemas lineales independientes de mínimos cuadrados.

Cada iteración se compone de tres pasos de estimación de mínimos cuadrados. En el primer paso, una matriz, por ejemplo \mathbf{A} , se obtiene a partir de las restantes (\mathbf{B} y \mathbf{C}), que son ajustadas a los valores obtenidos en los pasos de estimación previos. El algoritmo hace uso de las tres representaciones extendidas.

⁷J. B. Kruskal, «Three-way arrays: rank and uniqueness or trilinear decompositions, with applications to arithmetic complexity and statistics», *Linear Algebra and its Applications*, vol. 30, 1977.

Algoritmo 1 Algoritmo ALS

1. Ajustar $i = 0$. Inicializar $\widehat{\mathbf{A}}_{(i=0)} \in \mathbb{C}^{I \times R}$, $\widehat{\mathbf{B}}_{(i=0)} \in \mathbb{C}^{J \times R}$ y $\widehat{\mathbf{C}}_{(i=0)} \in \mathbb{C}^{K \times R}$
2. $i = i + 1$
3. Usando \mathbf{X}_1 , encontrar un estimado LS de \mathbf{C} :

$$\operatorname{argmin}_{\widehat{\mathbf{C}}_{(i)}} \left\| \mathbf{X}_1 - \left(\widehat{\mathbf{A}}_{(i-1)} \diamond \widehat{\mathbf{B}}_{(i-1)} \right) \widehat{\mathbf{C}}_{(i)}^T \right\|_F^2$$

4. Usando \mathbf{X}_2 , encontrar un estimado LS de \mathbf{A} :

$$\operatorname{argmin}_{\widehat{\mathbf{A}}_{(i)}} \left\| \mathbf{X}_2 - \left(\widehat{\mathbf{B}}_{(i-1)} \diamond \widehat{\mathbf{C}}_{(i)} \right) \widehat{\mathbf{A}}_{(i)}^T \right\|_F^2$$

5. Usando \mathbf{X}_3 , encontrar un estimado LS de \mathbf{B} :

$$\operatorname{argmin}_{\widehat{\mathbf{B}}_{(i)}} \left\| \mathbf{X}_3 - \left(\widehat{\mathbf{C}}_{(i)} \diamond \widehat{\mathbf{A}}_{(i)} \right) \widehat{\mathbf{B}}_{(i)}^T \right\|_F^2$$

6. Repetir los pasos 2 a 5 hasta alcanzar convergencia.
-

3.5. Sistema de comunicaciones MIMO híbrido

Una manera eficiente de sacar provecho al canal MIMO es el uso de la multiplexación espacial, cuyo objetivo es el de proporcionar tasas de transmisión altas sin sacrificar el ancho de banda, ya que su funcionamiento se basa en la transmisión de muestras diferentes de la señal de manera simultánea. Otro enfoque usado para explotar el canal MIMO es el uso del método conocido como diversidad espacial, en el que se busca mejorar la confiabilidad de la información transmitida enviando muestras redundantes de la señal transmitida. Un sistema MIMO híbrido combina estos dos enfoques.

A continuación se describe el esquema MIMO híbrido utilizado en este trabajo de grado.

El sistema de comunicaciones empleado es el presentado en [20]. Se considera un sistema con T antenas transmisoras y R receptoras. Las antenas transmisoras están divididas en K grupos, cada uno de los cuales emplea L_k antenas con $k = 1, 2, \dots, K$ y $T = L_1 + \dots + L_K$.

Cada grupo de antenas transmisoras cuenta con su propio esquema de transmisión, lo que significa que cada bloque puede tener diferentes ganancias de diversidad o multiplexación. Para este esquema el grado de diversidad o multiplexación de cada bloque transmisor está definido por una de las matrices del modelo PARAFAC, que se presentará en breve. El grado de redundancia o diversidad está definido por P , es decir, cada símbolo se repite durante P periodos de símbolo consecutivos.

Se define la matriz \mathbf{W}_k ($P \times L_k$), que está asociado al k -ésimo bloque transmisor. Esta matriz define la manera en que los símbolos son transmitidos a través de las dimensiones de espacio y tiempo. El grado de diversidad y multiplexación se puede controlar al escoger adecuadamente los coeficientes de esta matriz. La matriz \mathbf{H}_k ($R \times L_k$) representa el canal MIMO entre las L_k antenas transmisoras del k -ésimo grupo y las R antenas receptoras. Y finalmente \mathbf{S}_k ($N \times L_k$) es la matriz de símbolos del k -ésimo bloque transmisor en el n -ésimo periodo de símbolo.

3.5.1. Señal recibida como un tensor

El p -ésimo símbolo de redundancia de la señal recibida en el n -ésimo periodo de símbolo en la r -ésima antena receptora se puede expresar en forma escalar como

$$x_{n,p,r} = \sum_{k=1}^K \sum_{l_k=1}^{L_k} s_{n,l_k}^{(k)} w_{p,l_k}^{(k)} h_{r,l_k}^{(k)} + v_{n,p,r}$$

el cual puede interpretarse como el (n,p,r) -ésimo elemento de un tensor de tercer orden $\mathbf{X}(N \times P \times R)$, que, de acuerdo a la definición PARAFAC ([Subsección 3.3.1](#)), puede descomponerse como una suma de K tensores. El término v es el ruido aditivo.

La señal recibida también puede escribirse en forma matricial como

$$\mathbf{X}_n = \sum_{k=1}^K \mathbf{W}_k D_n(\mathbf{S}_k) \mathbf{H}_k^T + \mathbf{V}_n$$

Donde \mathbf{X}_n ($P \times K$) es la matriz de la señal recibida en el n -ésimo periodo de símbolo y $D_n(\mathbf{S}_k)$ es un operador que forma una matriz diagonal con la n -ésima fila de su matriz argumento en su diagonal.

Dada la señal recibida, la estimación de canal y la recuperación de los símbolos se realiza a través del algoritmo ALS, presentado en la sección [3.4](#), que consiste en estimar el conjunto de matrices \mathbf{H} , \mathbf{W}_r y \mathbf{S} del tensor de datos recibido.

Capítulo 4

Algoritmos propuestos para transmisión de video adaptativa, resultados y análisis

4.1. Introducción

En el presente capítulo se abordará la optimización Cross-Layer. Este enfoque nos permite abordar los sistemas de transmisión de una forma más abierta y adaptativa, la cual ayuda a concebir sistemas inteligentes y auto adaptables para mejorar la calidad del servicio en sistemas de comunicaciones de alta demanda y de necesidades específicas. En este trabajo se propone un sistema de transmisión de video adaptable. La idea principal es abordar el sistema de una forma específica y aprovechar la naturaleza de la información que se va a transmitir para así garantizar mejor calidad en la transmisión de video en tiempo real empleando los estándares de codificación AVC y HEVC.

4.2. Transmisión de video adaptativa

La optimización Cross-Layer nos permite adaptar las diferentes capas del sistema de comunicaciones dependiendo del tipo de servicio que se quiera prestar y de sus condiciones. En esta medida la idea es hacer que el sistema de transmisión de video se acople de tal forma que permita mejorar el rendimiento del sistema completo y que trate la cadena de bits de video de tal forma que priorice las secciones más importantes y que aumente la velocidad de transmisión en las secciones en las que sea posible.

Cómo se mencionó en el capítulo anterior el codificador de video AVC y HEVC organizan la cadena de bits en unidades NAL. Dependiendo del codificador el número de estas unidades cambia, pero dentro de toda esa variedad de unidades NAL existen unas que son más valiosas que otras al momento de reconstruir el video, debido a eso es conveniente que el sistema se adapte al momento de transmitir esa información y que permita blindar las unidades más valiosas y mejorar la tasa de transmisión con las que no lo son.

4.3. Optimización Cross-Layer

El enfoque tradicional por capas en las redes tiende a no ajustarse muy bien en los sistemas de comunicaciones inalámbricas, debido a la cantidad de usuarios que acceden a un medio de transmisión escaso y aleatorio. El rendimiento de algunos sistemas pueden ser optimizados considerando cierto acoplamiento entre las capas. Esta interacción entre las capas provee información útil permitiendo un mejoramiento en el rendimiento de la red.

La optimización Cross-layer define un concepto general de comunicación entre capas, considerando ciertas interacciones inteligentes entre ellas, que resulta en mejoramiento del rendimiento de la red. En la Figura 4.1 podemos observar las posibles interacciones que pueden haber entre las capas¹.

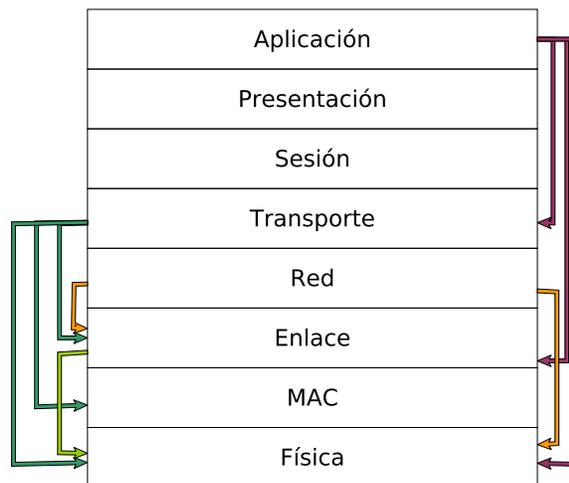


Figura 4.1: Posible interacción entre las capas [21]

El modelo tradicional de capas cerradas no sigue lo mejor posible las condiciones

¹R. P. Lijana Gavrilovska, *Ad Hoc Networking Towards Seamless Communications*. Springer, 2006 Springer.

inestables de los nodos dinámicos de las redes inalámbricas, haciendo obvio la necesidad de un enfoque flexible. Las comunicaciones verticales proveen un atajo en la entrega de información relevante resultando en una configuración en cada una de las capas en particular. La clave en la optimización Cross-Layer es encontrar una manera apropiada de abstraer cada una de las capas y unos adecuados mecanismos de acoplamiento².

4.4. Algoritmos propuestos para transmisión de video adaptativa

A continuación se presentan los algoritmos propuestos para la transmisión de video de forma adaptativa para los formatos de video comprimidos con AVC y HEVC. Los algoritmos están acoplados para su funcionamiento con el sistema de transmisión PARAFAC presentado en este trabajo. Los algoritmos propuestos se basan en el conocimiento por parte del transmisor del tipo de información que va a ser transmitida, por ello dependiendo del tipo de video se estructura un esquema de transmisión que provee las mejores condiciones al momento de enviar los paquetes. De esta manera es posible lograr una interacción más transparente y de mejor rendimiento entre las distintas capas que conforman el sistema y por lo tanto proveen un mejor rendimiento.

4.4.1. Algoritmo de transmisión de video AVC

En la Figura 4.2, es posible observar el algoritmo de transmisión propuesto, a continuación se explica de forma detallada:

- Como primera medida se codifica un video en formato .yuv en una cadena de bits AVC. Para ello se empleó un codificador realizado por el instituto Fraunhofer, el cual permite una configuración detallada de la forma en que se va a codificar el video. Este codificador permite elegir el tipo de secuencia de los cuadros y la forma en que serán codificados.
- Como se explicó anteriormente, esa cadena de bits se encuentra dividida en unidades NAL. Para garantizar que el video puede ser decodificado se garantizan las unidades NAL del inicio de la cadena, además del primer *frame* IDR, esto para efectos de la comprobación del algoritmo. Por lo tanto el algoritmo solamente tendrá efecto sobre las unidades que contienen los *frames*.

²R. P. Lijana Gavrilovska, *Ad Hoc Networking Towards Seamless Communications*. Springer, 2006 Springer.

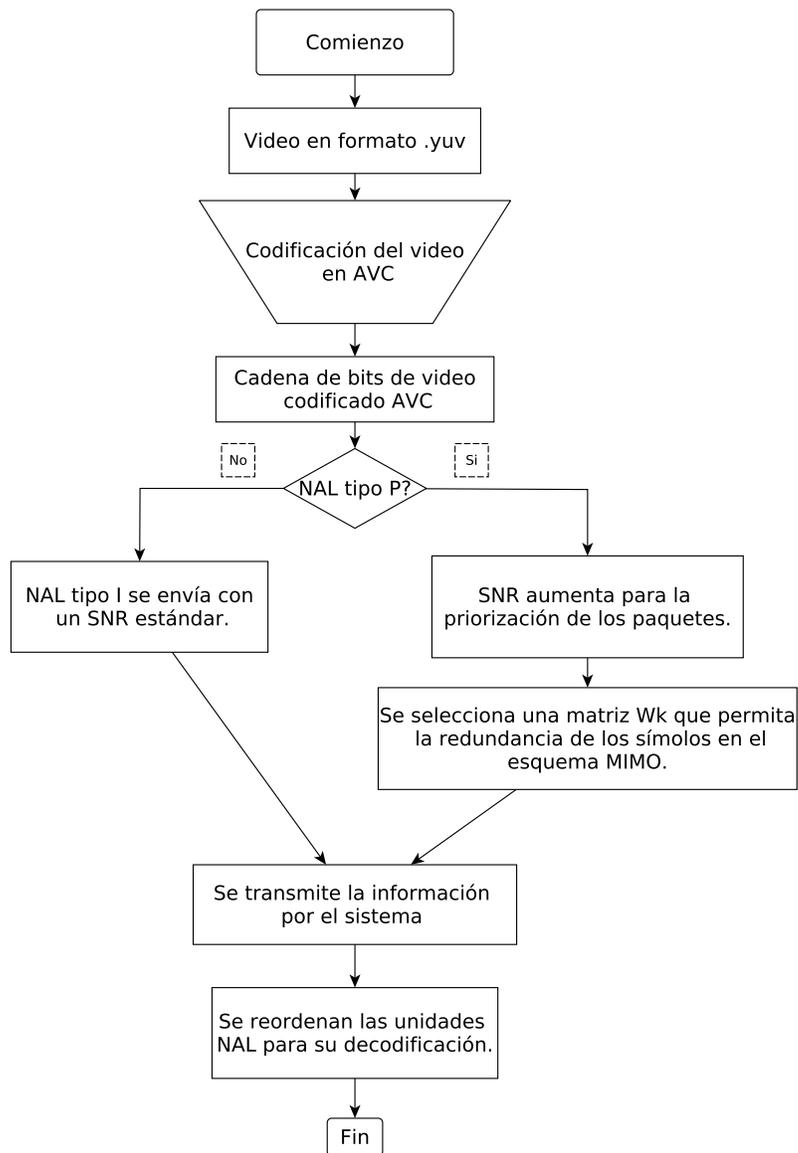


Figura 4.2: Diagrama de algoritmo de transmisión de video adaptativo AVC.

- Una vez que se tengan las unidades NAL identificadas, se separan las que tienen *frames* tipo I y tipo P. Para ello el programa realizado escanea la cadena de bits del video e interpreta el encabezado de cada una de las unidades NAL; posteriormente identifica qué tipo de cuadro se encuentra encapsulado y guarda estas direcciones para su posterior procesamiento.
- Si la unidad contiene un *frame* tipo P, el algoritmo indica que se debe aumentar la relación señal a ruido de la transmisión y que se debe elegir una matriz \mathbf{W}_k tal que aplique redundancia a los símbolos y que garantice una transmisión óptima.

En este caso en específico resulta un tanto confuso que se brinde mayor prioridad a los cuadros tipo P y no a los tipo I que contienen más información, pero se pudo observar a través de las simulaciones que el decodificador AVC tolera de mejor manera las pérdidas en las unidades tipo I que tipo P y por ende el algoritmo trata de blindar este tipo de paquetes.

- En el caso de los *frames* tipo I, se realiza una transmisión estándar, tal que garantice mayor velocidad de transmisión y mejore los periodos de latencia. Como se mencionó en el punto anterior suena un poco contradictorio que se dé prioridad a los paquetes que contienen cuadros tipo P, pero esto es debido a que la codificación de los *frames* tipo I es espacial, mientras los tipo P usan codificación temporal. Debido a eso las pérdidas de los cuadros tipo P afectan visualmente más que las pérdidas de *frames* tipo I.
- En el receptor después de la decodificación de todas las etapas del sistema de comunicaciones reorganiza las unidades NAL para que sean entregadas al decodificador AVC que posteriormente entrega el video reconstruido.

4.4.2. Algoritmo de transmisión de video HEVC

En la Figura 4.3, es posible observar el algoritmo de transmisión propuesto, a continuación se explica de forma detallada:

- Cómo primera medida se codifica un video en formato .yuv en una cadena de bits HEVC. Para ello se empleó un codificador realizado por el instituto Fraunhofer, el cual permite una configuración detallada de la forma en que se va a codificar el video. Este codificador permite elegir el tipo de secuencia de los cuadros y la forma en que serán codificados.
- Como se explicó anteriormente esa cadena de bits se encuentra dividida en unidades NAL. Para garantizar que el video puede ser decodificado se garantizan las unidades NAL del inicio de la cadena, además del primer *frame* IDR, esto para efectos de la comprobación del algoritmo. Por lo tanto el algoritmo solamente tendrá efecto sobre las unidades que contienen los *frames*.
- Una vez que se tengan las unidades NAL identificadas, se separan las que tienen *frames* tipo I y tipo P. Para ello el programa realizado escanea la cadena de bits del video e interpreta el encabezado de cada una de las unidades NAL; posteriormente identifica qué tipo de cuadro se encuentra encapsulado y guarda estas direcciones para su posterior procesamiento.
- Si la unidad contiene un *frame* tipo I, el algoritmo indica que se debe aumentar la relación señal a ruido de la transmisión y que se debe elegir una matriz \mathbf{W}_k tal

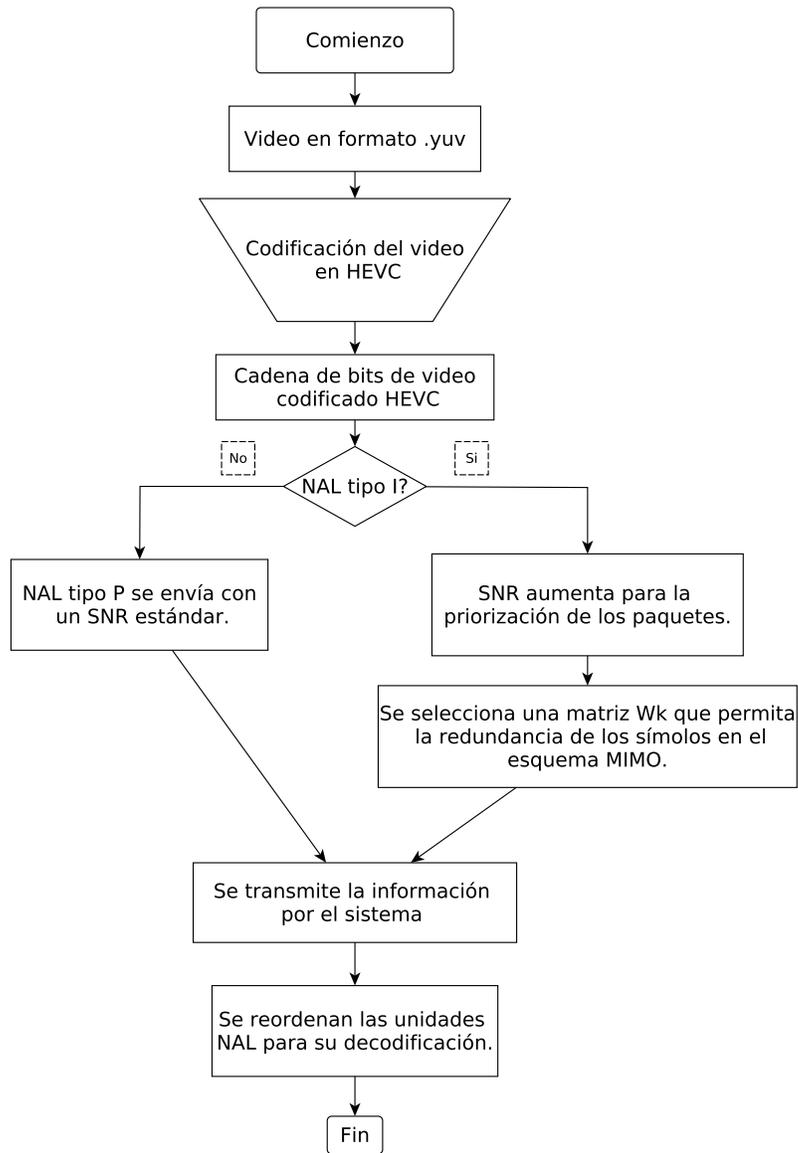


Figura 4.3: Diagrama de algoritmo de transmisión de video adaptativo HEVC.

que aplique redundancia a los símbolos y que garantice una transmisión óptima. En este caso ocurre lo contrario respecto al algoritmo de transmisión de video AVC. Mediante las simulaciones se puede observar que el decodificador de video HEVC se recupera mejor a las pérdidas de los paquetes tipo P que de tipo I, esto debido a que la compresión es mayor y a que los cuadros tipo I guardan mayor cantidad de información comprimida que las unidades que contienen los cuadros tipo P y por ende una pequeña pérdida en las unidades que contienen *frames* tipo I se traduce en una gran pérdida de calidad.

- En el caso de los *frames* tipo P, se realiza una transmisión estándar, tal que aumente la velocidad de transmisión y mejore los periodos de latencia. En este caso el decodificador HEVC se recupera de mejor manera a las unidades NAL que contienen cuadros tipo P corrompidos por la transmisión, debido a que en HEVC la interdependencia entre *frames* tipo I y tipo P es más fuerte y las predicciones que realizan los *frames* tipo P sobre los tipo I son más precisas y una pérdida en esas unidades acarrea más errores en la decodificación.
- En el receptor después de la decodificación de todas las etapas del sistema de comunicaciones reorganiza las unidades NAL para que sean entregadas al decodificador HEVC y posteriormente este puede reconstruir el video.

4.5. Resultados del rendimiento del sistema PARAFAC MIMO híbrido

En esta sección se evalúa el rendimiento del sistema MIMO híbrido con el modelo PARAFAC usando el algoritmo ALS por medio de simulación por computador. Asimismo, se compara con el rendimiento presentado por un sistema sin el esquema tensorial PARAFAC.

Entrada binaria

La entrada del sistema consiste en una secuencia binaria de 2^{20} bits de carácter aleatoria.

Codificación de canal

Se configuró un turbo codificador con las siguientes características:

Parámetro	Valor
Polinomio generador primer codificador constituyente	$1 + D_2 + D_3$
Polinomio generador segundo codificador constituyente	$1 + D + D_3$
Longitud de restricción	4
Tamaño del entrelazador	2^6
Métrica de decodificación	LOGMAX

Cuadro 4.1: Parámetros de configuración del turbo código

Modulación

Se configuró un modulador con la técnica *Modulación de Amplitud en Cuadratura* con tamaño de constelación de 64 (64QAM).

OFDM

Se configuró un transmisor OFDM con las siguientes especificaciones:

Parámetro	Valor
Tamaño de la FFT	64
Número de subportadoras usadas	52
Frecuencia de muestreo	64 MHz
Espaciado de subportadora	312,5 KHz
Duración del prefijo cíclico	0,8 μ s
Duración del símbolo de datos	3,2 μ s
Duración del símbolo completo	4 μ s

Cuadro 4.2: Parámetros de OFDM utilizados en simulación

Canal

Se asume un canal de propagación multitrayecto Rayleigh y ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN).

Las características del sistema presentadas hasta aquí son comunes a todos los bloques definidos en el esquema de transmisión MIMO híbrido. El grado de diversidad y redundancia, así como el número de antenas lo define la matriz \mathbf{W}_k , que se define para cada bloque transmisor, como se presenta a continuación.

Esquema de transmisión

Como se afirmó anteriormente, la matriz \mathbf{W}_k define el nivel de redundancia y el número de antenas de transmisión de cada bloque. Muchas configuraciones son posibles de acuerdo a los elementos que se definan en \mathbf{W}_k .

La configuración definida para el esquema mimo híbrido consiste en hacer $K = 2$, $L_1 = L_2 = 2$. Se define el nivel de redundancia en $P = 2$. Las matrices \mathbf{W}_k son las

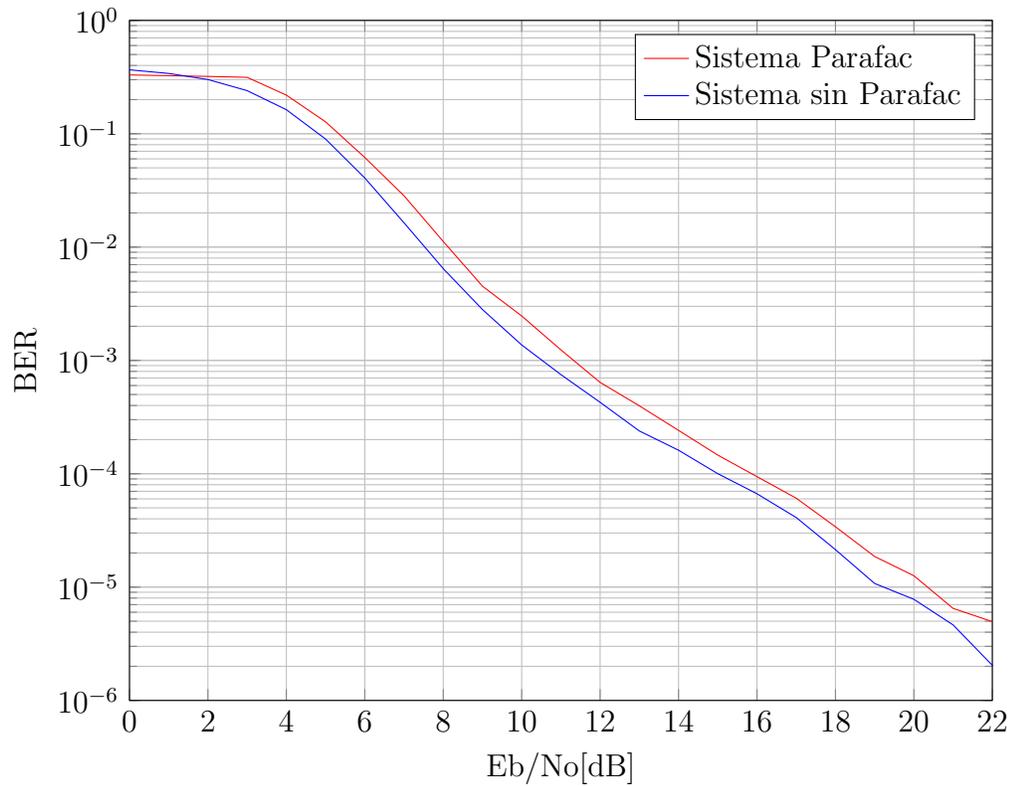


Figura 4.4: Rendimiento del sistema con modelo PARAFAC

siguientes.

$$\mathbf{W}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Análisis

La figura 4.4 muestra la comparación del rendimiento de los sistemas MIMO híbrido con modelo PARAFAC y MIMO híbrido sin modelo PARAFAC. El receptor del segundo sistema conoce perfectamente el canal de comunicaciones, lo que conduce a que este sistema presenta el mejor rendimiento, contrario al sistema PARAFAC, que no conoce el canal y lleva a cabo una estimación de este sin ningún parámetro conocido.

Cabe resaltar que la inicialización de las matrices incide fuertemente en la velocidad de la convergencia del algoritmo ALS. La matriz \mathbf{W}_k por lo general se conoce en el receptor, lo que simplifica los pasos del algoritmo ALS a solo dos. Sin embargo, el modelo PARAFAC presentado podría estimar las matrices \mathbf{W}_k , \mathbf{H} y \mathbf{S} sin la necesidad de conocer a priori ningún parámetro.

Gracias a la unicidad de la descomposición tensorial PARAFAC es posible estimar el canal y los símbolos transmitidos sin recurrir a ningún conocimiento previo sobre el sistema, como el envío desde el receptor de secuencias de entrenamiento.

4.6. Resultados de transmisión de video de forma adaptativa

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en las cuales se prueban los algoritmos propuestos. Se emplearon secuencias de video de diferentes naturalezas; además, éstas secuencias fueron codificadas de diferente manera respecto al número de cuadros tipo P y tipo I para de esta manera tener certeza sobre las pruebas y evitar un posible sesgo en los resultados.

4.6.1. Parámetros de simulación

La simulación se dividió en dos partes fundamentales: una de ellas fue la simulación del sistema de comunicaciones empleando la librería IT++ para el sistema de comunicaciones; y TensorLab 3.0 para octave o MATLAB para el procesamiento empleando PARAFAC. Ambas librerías son de uso libre y ampliamente empleadas por la comunidad científica y con gran aval por parte de ella. En esta primera parte el resultado final de la simulación fue un Bit Error Rate (BER), el cual nos permite saber el rendimiento del sistema de comunicaciones propuesto empleando PARAFAC.

La segunda parte de la simulación consiste en un programa realizado en C++, el cual importa las secuencias de video AVC y HEVC en formato binario e identifica cada una de sus unidades NAL mediante la interpretación del encabezado de cada una de ellas. Posteriormente se separan las unidades fundamentales esenciales para la decodificación, las cuales se garantizan en su totalidad al final de la simulación para poder reconstruir el video. Luego se identifican las unidades que contienen los cuadros tipo P y tipo I, y se realiza el empaquetamiento de unidad NAL individual dependiendo del codificador de acuerdo a la especificación de la IETF. Cada uno de estos paquetes es introducido en una secuencia de código que los altera dependiendo del BER al que se esté simulando cada tipo de paquete. Estos son alterados de manera aleatoria y posteriormente reordenados para su decodificación.

Las características de las secuencias de video empleadas en las simulaciones se pueden observar en la tabla 4.3. Estas secuencias son de diferente naturaleza: unas son de alto movimiento, como el de carros a alta velocidad, y otras de bajo movimiento, como la filmación de la corriente de un río tranquilo. La diferencia de éstas secuencias y la forma

en que fueron codificadas hace que los resultados sean imparciales y que el algoritmo sea probado de forma que tome las secuencias de manera integral y que, sin importar la naturaleza del video, el algoritmo se desempeñe de forma independiente.

Nombre del archivo	# <i>Frames</i>	FPS	Resolución	Intra Period
akiyo_cif.yuv	300	24	352 x 288	30
bridgeclose_qcif.yuv	2001	24	176 x 144	100
bridgefar_cif.yuv	2101	24	352 x 288	50
bus_cif.yuv	150	24	352 x 288	10
carphone_qcif.yuv	382	24	176 x 144	30
foreman_cif.yuv	300	24	352 x 288	15
mobile_cif.yuv	300	24	352 x 288	15
news_cif.yuv	300	24	352 x 288	30

Cuadro 4.3: Secuencias de video empleadas para la simulación.

4.6.2. Resultados de evaluación subjetiva

Las aplicaciones de video digital como la televisión digital, el cine digital, la video conferencia, televisión IP, televisión móvil, transmisión de video en tiempo real sobre internet y medios inalámbricos apuntan siempre a un observador humano como cliente final. Generalmente se emplea la evaluación de la calidad del video subjetiva solamente como una representación porcentual de la calidad del mismo, donde se pretende estimar la percepción del observador promedio. La evaluación de video subjetiva juegan un rol crítico en el diseño de sistemas de comunicaciones de video, desde el punto de la adquisición del video hasta su representación frente al usuario final³.

A continuación se expondrán los resultados de la evaluación de video subjetiva obtenidos aplicando los algoritmos de transmisión propuestos en este trabajo.

Resultados de evaluación subjetiva transmisión de video AVC

En la Figura 4.5 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video *akiyo_cif.yuv*. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con AVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro

³A. C. B. Kalpana Seshadrinathan Rajiv Soundararajan y L. K. Cormack, «A subjective study to evaluate video quality assessment algorithms», *IEEE Transactions on Image Processing (Volume:19 , Issue: 6)*, February, 2010.

corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Éste fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad media, en el cual se observa a una mujer presentando noticias. En el video hay pocos cambios en el fondo, casi todos los cambios entre los *frames* ocurren en la cara de la mujer.



Figura 4.5: Resultados de transmisión de video akiyo_cif.yuv AVC

En la Figura 4.6 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video bridgeclose_qcif.yuv. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con AVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Éste fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad baja. Se observa un río que se mueve a muy baja velocidad y un gran puente con un tráfico casi estático.

En la Figura 4.7 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video bridgefar_cif.yuv. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con AVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Éste fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad baja. Se observa un río que fluye a muy baja velocidad y un puente sin tráfico.



Figura 4.6: Resultados de transmisión de video `bridgeclose_qcif.yuv` AVC



Figura 4.7: Resultados de transmisión de video `bridgefar_cif.yuv` AVC

En la Figura 4.8 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video `bus_cif.yuv`. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con AVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Éste fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a alta velocidad. Se pueden observar un autobús y un carro que se mueven a alta velocidad. Este tipo de videos representan un desafío mayor debido a que casi todos sus *frames* son diferentes y la predicción inter e intra cuadro suelen ser más complejas.

En la Figura 4.9 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video `carphone_qcif.yuv`. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con AVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el



Figura 4.8: Resultados de transmisión de video `bus_cif.yuv` AVC

algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Éste fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad media. Se observa a un hombre hablando de forma enérgica. En la escena el fondo permanece casi estático mientras lo que cambia mayoritariamente es la casa del hombre mientras habla.



Figura 4.9: Resultados de transmisión de video `carphone_qcif.yuv` AVC

En la Figura 4.10 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video `foreman_cif.yuv`. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con AVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Éste fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad media-alta, en donde se ve a un hombre hablando de forma enérgica y que posteriormente hace una cambio repentino de escena y muestra rápidamente una

construcción. El video es retador al momento de realizar la compresión del movimiento repentino de la cámara donde la mayoría de los *frames* son diferentes y la predicción es más compleja.



Figura 4.10: Resultados de transmisión de video *foreman_cif.yuv* AVC

En la Figura 4.11 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video *foreman_cif.yuv*. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con AVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Éste fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad alta, donde tanto el fondo como el tren es cambiante en todo momento.



Figura 4.11: Resultados de transmisión de video *mobile_cif.yuv* AVC

En la Figura 4.12 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video *foreman_cif.yuv*. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con AVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no

adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Éste fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad media-alta, donde se observan a dos personajes presentando noticias mientras, en el fondo se observa a una pareja de bailarines realizando su acto. Este tipo de escenas contienen cierta redundancia temporal en algunos macrobloques, eso ayuda a que la compresión sea más efectiva.



Figura 4.12: Resultados de transmisión de video `news_cif.yuv` AVC

Resultados de evaluación subjetiva transmisión de video HEVC

En la Figura 4.13 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video `akiyo_cif.yuv`. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con HEVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Éste fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad media, en el cual se observa a una mujer presentando noticias. En el video hay pocos cambios en el fondo, casi todos los cambios entre los *frames* ocurren en la cara de la mujer.

En la Figura 4.14 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video `bridgeclose_qcif.yuv`. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con HEVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema



Figura 4.13: Resultados de transmisión de video akiyo_cif.yuv HEVC

tradicional. Este fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad baja. Se observa un río que se mueve a muy baja velocidad y un gran puente con un tráfico casi estático.



Figura 4.14: Resultados de transmisión de video bridgeclose.qcif.yuv HEVC

En la Figura 4.15 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video bridgefar_cif.yuv. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con HEVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Este fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad baja. Se observa un río que fluye a muy baja velocidad y un puente sin tráfico.

En la Figura 4.16 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video bus_cif.yuv. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con



Figura 4.15: Resultados de transmisión de video `bridgefar_cif.yuv` HEVC

HEVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Este fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a alta velocidad. Se pueden observar un autobús y un carro que se mueven a alta velocidad. Este tipo de videos representan un desafío mayor debido a que casi todos sus *frames* son diferentes y la predicción inter e intra cuadro suelen ser más complejas.



Figura 4.16: Resultados de transmisión de video `bus_cif.yuv` HEVC

En la Figura 4.17 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video `carphone_qcif.yuv`. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con HEVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema

tradicional. Este fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad media. Se observa a un hombre hablando de forma enérgica. En la escena el fondo permanece casi estático, mientras lo que cambia mayoritariamente es la casa del hombre mientras habla.



Figura 4.17: Resultados de transmisión de video `carphone_qcif.yuv` HEVC

En la Figura 4.18 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video `foreman_cif.yuv`. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con HEVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Este fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad media-alta, en donde se ve a un hombre hablando de forma enérgica y que posteriormente hace un cambio repentino de escena y muestra rápidamente una construcción. El video es retardador al momento de realizar la compresión del movimiento repentino de la cámara, donde la mayoría de los *frames* son diferentes y la predicción es más compleja.



Figura 4.18: Resultados de transmisión de video `foreman_cif.yuv` HEVC

En la Figura 4.19: Se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video `foreman_cif.yuv`, en el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con HEVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Este fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad alta, donde tanto el fondo cómo el tren es cambiante en todo momento.



Figura 4.19: Resultados de transmisión de video `mobile_cif.yuv` HEVC

En la Figura 4.20 se pueden observar 3 cuadros correspondientes a la secuencia de video `foreman_cif.yuv`. En el primer cuadro se observa un *frame* del video original codificado con HEVC, presente en el transmisor del sistema, el segundo cuadro corresponde al resultado de la transmisión del *frame* original mediante el sistema no adaptativo y el tercero es el resultado de la transmisión del *frame* original con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el *frame* transmitido con el sistema empleando el algoritmo adaptativo posee una nitidez superior al *frame* del sistema tradicional. Este fragmento de video corresponde a una secuencia de movimiento a velocidad media-alta, donde se observan a dos personajes presentando noticias mientras. En el fondo se observa a una pareja de bailarines realizando su acto. Este tipo de escenas contienen cierta redundancia temporal en algunos macro bloques, eso ayuda a que la compresión sea más efectiva.

4.6.3. Resultados de la evaluación cuantitativa

Cómo parámetro de evaluación de la calidad del video se empleó el cálculo del Peak Signal to Noise Ratio (PSNR). A continuación se explica de forma detallada este concepto.



Figura 4.20: Resultados de transmisión de video `news_cif.yuv` HEVC

El parámetro PSNR es un término en ingeniería que estima la proporción entre la máxima potencia de una señal y la potencia del ruido que la corrompe y afecta la fidelidad de su representación. El PSNR es expresado usualmente en decibelios.

El PSNR es usado comúnmente como medida de calidad de reconstrucción de codificadores de compresión de video con pérdidas, como lo son AVC y HEVC. La señal en este caso son los datos originales, y el ruido es el error producido por la compresión. Cuando se comparan codificadores es usado como aproximación de la percepción humana de la calidad de la reconstrucción. En algunos casos la reconstrucción aparenta ser muy parecida a la original que en otros, incluso cuando se obtienen PSNR bajos. Normalmente un PSNR alto indica que la reconstrucción es de alta calidad. En el caso ideal el PSNR es de 100 dB⁴. El PSNR es calculado empleando Mean Squared Error (MSE) mediante la ecuación 4.1.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) [dB] \quad (4.1)$$

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} [f(x, y) - g(x, y)]^2 \quad (4.2)$$

Donde:

- $f(x, y)$ es la variable de entrada (color del píxel original).
- $g(x, y)$ es la variable de salida (color del píxel procesado).

⁴Z. Kotevski y P. Mitrevski, «Ict innovations 2009», en, D. Davcev y J. M. Gómez, eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, cap. Experimental Comparison of PSNR and SSIM Metrics for Video Quality Estimation, págs. 357-366, ISBN: 978-3-642-10781-8. DOI: [10.1007/978-3-642-10781-8_37](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10781-8_37). dirección: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-10781-8_37.

- m es el número de píxeles horizontales.
- n es el número de píxeles verticales.

Para realizar el cálculo del PSNR se empleó la herramienta FFMPEG la cual posee gran cantidad de filtros y herramientas para realizar distintos tipos de operaciones con videos de diferentes formatos.

Resultados algoritmo AVC

En la Figura 4.21 se observa el resultado de la simulación de la transmisión de video de forma adaptativa empleando el sistema de PARAFAC mostrado en este trabajo. Se puede observar una mejoría entre la transmisión adaptativa y la que no lo es. El hecho de tratar la cadena de bits de manera especial hace que el sistema sea mucho más adaptable y tolerante a los errores. En el caso del sistema que transmite video AVC se decidió priorizar los paquetes tipo P debido a que el decodificador de video responde mejor a pequeñas pérdidas en los paquetes tipo I que de tipo P.

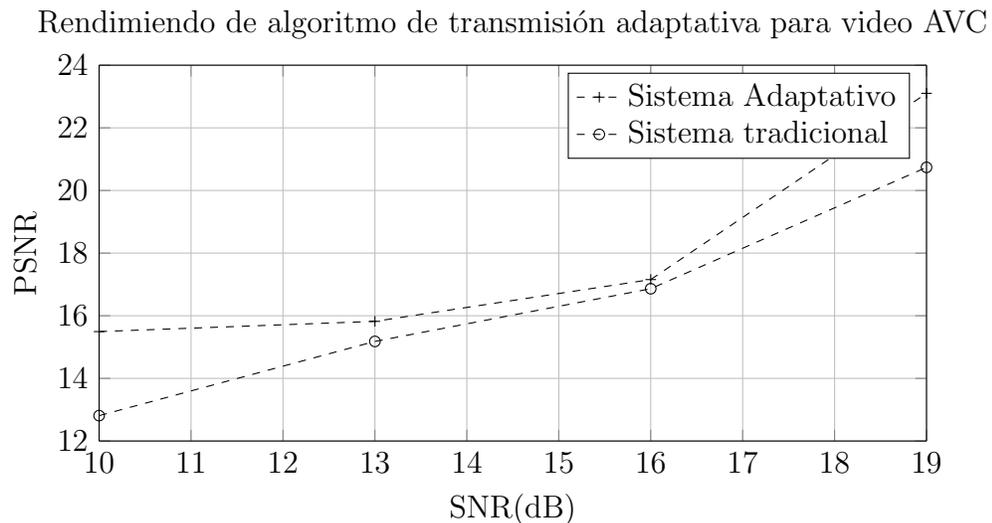


Figura 4.21: Resultados de la comprobación del algoritmo de transmisión adaptativo AVC.

Los valores de PSNR con el algoritmo propuesto para la transmisión de video AVC son relativamente bajos debido a lo exigente que fue el canal de simulación empleado. En general, el rendimiento mejora de manera sustancial. El algoritmo hace que el sistema transmita el video de forma especial y eso hace que el rendimiento en cuanto a PSNR mejore respecto a la transmisión no adaptativa. Además el emplear el modelo PARAFAC para realizar la estimación del canal mejora los tiempos de transmisión y

baja los periodos de latencia, lo que indica que no se deben tener procedimientos de estimación de canal durante la transmisión. Siempre y cuando se garantice una buena capacidad de procesamiento el rendimiento total del sistema es muy bueno.

Resultados algoritmo HEVC

En la Figura 4.22 se observa el resultado de la simulación de la transmisión de video de forma adaptativa empleando el sistema de PARAFAC mostrado en este trabajo. Se puede observar una mejoría entre la transmisión adaptativa y la que no lo es. El hecho de tratar la cadena de bits de manera especial hace que el sistema sea mucho más adaptable y tolerante a los errores. En el caso del sistema que transmite video HEVC se decidió priorizar los paquetes tipo I debido a que el decodificador de video responde mejor a pequeñas pérdidas en los paquetes tipo P que de tipo I.

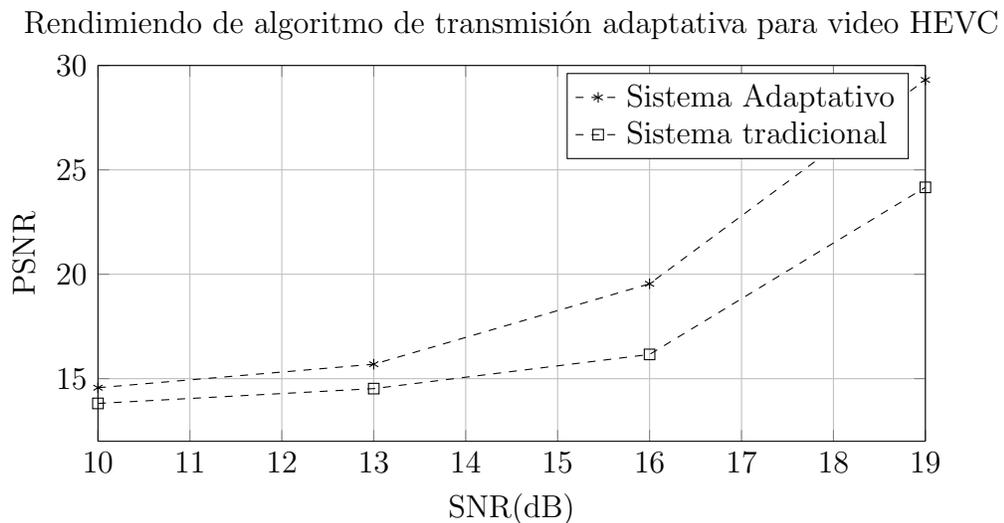


Figura 4.22: Resultados de la comprobación del algoritmo de transmisión adaptativo HEVC.

Los valores de PSNR con el algoritmo propuesto para la transmisión de video HEVC son relativamente bajos debido a lo exigente que fue el canal de simulación empleado. En general, el rendimiento mejora de manera sustancial. El algoritmo hace que el sistema transmita el video de forma especial y eso hace que el rendimiento en cuanto a PSNR mejore respecto a la transmisión no adaptativa. Además el emplear el modelo PARAFAC para realizar la estimación del canal mejora los tiempos de transmisión y baja los periodos de latencia, lo que indica que no se deben tener procedimientos de estimación de canal durante la transmisión. Siempre y cuando se garantice una buena capacidad de procesamiento el rendimiento total del sistema es muy bueno.

4.7. Conclusiones

En esta tesis hemos propuesto un sistema de comunicaciones MIMO híbrido basado en el modelo tensorial análisis de factores paralelos conocido como PARAFAC. Asimismo, hemos propuesto dos algoritmos de transmisión de video adaptativo para la mejora de la calidad del servicio en el sistema de comunicaciones presentado.

Una de los principales enfoques de esta tesis es el modelamiento de la señal recibida en el receptor como un arreglo tridimensional. En general podemos concluir que el modelamiento tensorial resulta útil en aplicaciones de comunicaciones donde la señal de información presente una naturaleza multivariable, como se analizó en este trabajo de grado, y, en general, en cualquier campo donde se presente este comportamiento. Adicionalmente, podemos mencionar que el modelamiento multidimensional en el procesamiento de señales favorece la creación de nuevos enfoques en el desarrollo de sistemas de comunicaciones inalámbricos en el sentido de que permite el uso de varias formas de diversidad, pues la aplicación de técnicas de descomposición tensorial como la analizada aquí (PARAFAC) permite la separación de señales y la estimación del canal, como en el sistema de comunicaciones analizado en este trabajo.

Un sistema inteligente de transmisión de información inalámbrica ayuda a mejorar la calidad del servicio prestado, debido a que el conocimiento del tipo de información a transmitir permite una configuración del sistema de forma que priorice paquetes importantes. En el caso del video es importante garantizar ciertos paquetes que, de ser perdidos, resultaría imposible su reconstrucción o, dado el caso, resultaría en un video de mala calidad. Los algoritmos propuestos en este trabajo de grado ayudan a mejorar la calidad del servicio prestado. Estos algoritmos configuran el sistema de transmisión de tal manera que blindan los paquetes más sensibles de acuerdo al codificador empleado y aumentan la velocidad de transmisión con piezas de información que así lo permiten.

En particular, podemos resaltar las siguientes conclusiones:

- El rendimiento del sistema de comunicaciones basado en el modelo tensorial es muy similar al sistema que no lo usa. Sin embargo, hay que aclarar que:
- El sistema de comunicaciones basado en PARAFAC presentado en este trabajo de grado introduce la ventaja de que requiere recurrir a ninguna técnica de conocimiento del canal, como secuencias de entrenamiento, para la estimación de este. Asimismo permite la separación de señales de diferentes fuentes combinadas en el receptor. Esto resulta como propiedad de la descomposición tensorial utilizada.
- Los algoritmos de transmisión de video adaptativos propuestos muestran una mejora en la calidad de video recibido en el decodificador. Esto es debido a que

el sistema se ajusta a la naturaleza de la información que desea enviar y por ende mejora las condiciones de transmisión.

- Al realizar el cálculo de la descomposición PARAFAC con el algoritmo ALS, es importante seleccionar los parámetros de inicio de forma correcta; en caso contrario el algoritmo podría tardar mucho en encontrar la convergencia. Actualmente existen librerías como TensorLab 3.0 que permiten encontrar estos parámetros de forma automática.
- La calidad de los videos recibidos pueden ser mejoradas mediante algoritmos que se enfoquen en la retransmisión de paquetes prioritarios. El alcance de este trabajo fue el de adaptar el sistema para mejorar la transmisión no crear algoritmos de recuperación y manejo de prioridad. Este puede ser un buen tema para trabajos de investigación futuro.

4.7.1. Recomendaciones y trabajo futuro

De la experiencia adquirida del trabajo realizado podemos mencionar las siguientes recomendaciones y propociones para trabajos futuros.

- Para acelerar los tiempos de simulación es mejor trabajar con lenguajes de programación orientados al la computación científica cómo C++ o Python. Estos lenguajes ayudan a mejorar el tiempo de ejecución de los programas realizados.
- Una buena alternativa para realizar simulaciones es emplear servicios de plataforma como servicios de computación en la nube. De esta manera es posible emplear instancias de múltiples núcleos y mejorar los tiempos en la ejecución.
- Emplear codificadores desarrollados para el uso académico. No incurrir en el error de emplear codificadores con licencias que no permitan este tipo de usos. Así mismo emplear secuencias de video de código libre.
- Emplear librerías de amplio uso por la comunidad científica. Las librerías desconocidas pueden llevar a resultados inconclusos. Es importante realizar una buena validación antes de empezar a escribir código.
- Como posible trabajo futuro se puede diseñar algoritmos de transmisión adaptativos para otro tipo de formatos de video cómo VP8 o VP9. Estos codificadores de uso libre están siendo ampliamente usados por la comunicad.
- Adoptar los tensores como compresores de información. Existen varios trabajos que emplean este enfoque para el almacenamiento de archivos. Quizás sea viable

emplear este punto de vista para comprimir información al momento de realizar la transmisión en sistemas de comunicaciones inalámbricas .

- Emplear los tensores para desarrollar codificadores de video Mediante este paradigma se han publicado varios trabajos referentes a temas similares. Sería un buen enfoque el codificar video mediante tensores para que estos puedan ser transmitidos en sistemas de video adaptativos.

Acrónimos

ALS *Alternating Least Squares*. 26, 28, 31

AVC Advanced Video Coding. 14, 16, 17, 34, 35, 37, 38

AWGN *Additive White Gaussian Noise*. 3

BER Bit Error Rate. 37

CANDECOMP *Canonical Decomposition*. 23

HEVC High Efficiency Video Coding. 14–17, 34, 35, 37, 38

IETF Internet Engineering Task Force. 13, 17

ISO/IEC Organización Internacional de estandarización/Comisión Electrotécnica Internacional. 9, 14

ITU-T Unión Internacional de Telecomunicaciones. 9, 14

JCT-VC Joint Collaborative Team on Video Coding. 14

MIMO *Multiple-input Multiple-output*. 1, 2, 19, 28, 30, 31

MPEG Moving Picture Experts Group. 14

NAL Network Abstraction Layer. 12–14, 16–18, 34–37

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*. 6, 7, 29
. 19, 23–28, 30, 31

QAM *Quadrature Amplitude Modulation*. 5, 6

QP Parámetro de Cuantización. 10, 12

QPSK *Quadrature Phase Shift Keying.* 5

RTP Real Time Protocol. 13, 17, 37

SEI Supplemental enhancement information. 16

STBC *Space–Time Block Coding.* 1, 2

SVD *Singular Value Decomposition.* 25

VCEG Video Coding Experts Group. 14

VCL Video Coding Layer. 12, 14, 17, 18

VPS Video Parameter Set. 16

VUI Video Usablity Information. 16

WPP Wavefront Parallerl processing. 17

Bibliografía

- [1] H. Zarrinkoub, *Understanding LTE with MATLAB: from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation*. John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
- [2] E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj y H. V. Poor, *MIMO Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2007.
- [3] C. Cox, *An introduction to LTE : LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications*. John Wiley & Sons, Ltd., 2012.
- [4] K. Gracie y M.-H. Hamon, «Turbo and turbo-like codes: principles and applications in telecommunications», *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, 2007.
- [5] H. Jafarkhani, *Space-Time Coding. Theory and Practice*. Cambridge University Press, 2005.
- [6] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2002.
- [7] Y. S. Cho, J. Kin, W. Y. Yang y C. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications With MATLAB®*. John Wiley & Sons, Ltd., 2010.
- [8] H. Wang, L. P. Kondi, A. Luthra y S. Ci, *4G Wireless Video Communications*. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
- [9] I. E. Richardson, *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. Wiley, 2010.
- [10] *Vp8 data format and decoding guide*, Internet Engineering Task Force (IETF), 2011.
- [11] *Rtp payload format for h.264 video*, Internet Engineering Task Force (IETF), 2011.
- [12] W.-J. H. Gary J. Sullivan Jens-Rainer Ohm y T. Wiegand, «Overview of the high efficiency video coding (hevc) standard», *IEEE Transactions On Circuits And Systems For Video Technology*, Vol. 22, NO. 12, December 2012.
- [13] *Rtp payload format for h.265 video*, Internet Engineering Task Force (IETF), 2015.

- [14] P. Comon, «Tensor decompositions: state of the art and applications», *Mathematics in Signal Processing*, vol. V, 2001.
- [15] T. G. Kolda y B. W. Bader, «Tensor decompositions and applications», *SIAM REVIEW*, vol. 51, 2009.
- [16] C. Khatri y C. Rao, «Solutions to some functional equations and their applications to characterization of probability distributions», *Sankhya*, vol. 30, 1968.
- [17] A. D. Almeida, «Tensor modeling and signal processing for wireless communication systems. networking and internet architecture», 2007, Université de Nice Sophia Antipolis.
- [18] J. B. Kruskal, «Three-way arrays: rank and uniqueness or trilinear decompositions, with applications to arithmetic complexity and statistics», *Linear Algebra and its Applications*, vol. 30, 1977.
- [19] R. A. Horn y C. R. Johnson, *Matrix Analysis*. Cambridge University Press, 2013.
- [20] A. de Almeida, G. Favier, J. Mota y C. C. Cavalcante, «Parafac models for hybrid mimo systems: joint channel estimation and detection», *Wireless World Research Forum*,
- [21] R. P. Lijana Gavrilovska, *Ad Hoc Networking Towards Seamless Communications*. Springer, 2006 Springer.
- [22] A. C. B. Kalpana Seshadrinathan Rajiv Soundararajan y L. K. Cormack, «A subjective study to evaluate video quality assessment algorithms», *IEEE Transactions on Image Processing (Volume:19 , Issue: 6)*, February, 2010.
- [23] Z. Kotevski y P. Mitrevski, «Ict innovations 2009», en, D. Davcev y J. M. Gómez, eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, cap. Experimental Comparison of PSNR and SSIM Metrics for Video Quality Estimation, págs. 357-366, ISBN: 978-3-642-10781-8. DOI: [10 . 1007 / 978 - 3 - 642 - 10781 - 8 _ 37](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-10781-8_37). dirección: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-10781-8_37.