

Universidad de Málaga
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación
Departamento de Ingeniería de Comunicaciones



RESUMEN TESIS DOCTORAL

**DETECTORES MULTIVELOCIDAD PARA COMUNICACIONES
MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN**

Fecha de lectura:
16 de JUNIO de 2006

Calificación
SOBRESALIENTE CUM LAUDE

Autora:
ANA MARÍA BARBANCHO PÉREZ

Directores:
JOSÉ TOMÁS ENTRAMBASAGUAS MUÑOZ
ISABEL BARBANCHO PÉREZ

ÍNDICE

1. Descripción del trabajo	1
1.1. Origen	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Desarrollo	3
1.4. Conclusiones	4
2. Originalidad	7
3. Resultados	10
4. Aplicabilidad	13
Anexo A: Financiación y desarrollo comercial	15
Anexo B: Trabajos publicados sobre la Tesis	16
Anexo C: Bibliografía	18

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

1.1. Origen

El estándar europeo de comunicaciones móviles de tercera generación, UMTS (*Universal Mobile Communications System*), tiene definido para el interfaz aire, acceso múltiple por división de código de banda ancha, WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). Este tipo de tecnología de acceso al medio compartido está limitada por la interferencia multiacceso (MAI).

El efecto de la interferencia multiacceso, en los sistemas CDMA, se puede mitigar bastante si se diseña de manera adecuada el detector; por consiguiente, en estos sistemas la capacidad de transmisión va a estar limitada, entre otros factores, por el tipo de detector que se utilice. El mejor detector que se puede utilizar es el óptimo multiusuario [Verdu98], [Barbancho01] el cual presenta el problema de que su complejidad crece de forma exponencial con el número de usuarios activos en el sistema. Dado que el detector óptimo es inviable debido a su complejidad, en la práctica, se utilizan aproximaciones lineales al mismo como son: el detector de decorrelación y el MMSE (*Minimum Mean Square Error*). También existen detectores que utilizan técnicas de cancelación de interferencias, cuyo objetivo es eliminar la mayor cantidad de interferencia multiacceso posible. Los dos esquemas principales de este tipo de detección son la cancelación sucesiva de interferencias SIC (*Successive Interference Cancellation*) y la cancelación paralela de interferencias PIC (*Parallel Interference Cancellation*).

Sobre estas técnicas de detección aplicadas a la señal CDMA monovelocidad, se encuentran numerosas referencias [Buehrer00], [Moshavi96]. Sin embargo, no ocurre lo mismo para señales CDMA multivelocidad con códigos de ensanchamiento de longitud variable y con un código de aleatorización superpuesto, como es el caso de la señal del sistema UMTS.

De hecho, en la literatura sólo se encuentran casos concretos de detectores multivelocidad entre los cuales algunos tienen severas restricciones en las velocidades posibles de los usuarios [Saqib99], [Wijting99].

La evaluación del funcionamiento del sistema UMTS a nivel físico, que permite realizar la planificación celular, se realiza mediante simuladores de enlace [Melis00]. Éstos se basan en la simulación del sistema transmisor-receptor a nivel físico, con el fin de calcular la probabilidad de error de bit o BER (*Bit Error Rate*) y la probabilidad de error de bloque o BLER (*Block Erasure Rate*), en función de la relación señal a ruido más interferencia o SIR (*Signal to Interference Ratio*) y de la relación energía por bit a ruido o E_b/N_o . Las salidas de estos simuladores son las entradas de los simuladores de nivel superior, denominados simuladores de sistema, que caracterizan a cada usuario como una caja negra, cuya salida es la calidad de la señal (BER y BLER). Estos simuladores utilizan el detector monousuario de correlación [Moreno02], debido a la dificultad de implementar técnicas de detección más avanzadas, dada la complejidad computacional y, en consecuencia, el tiempo de simulación que requerirían.

El proceso que realizan los simuladores de enlace, se podría simplificar si el sistema transmisor-receptor a nivel físico, sin contar las codificaciones y los códigos de control

de errores, se viera como una caja negra que proporciona la BER y la BLER en función de la SIR o de la E_b/N_0 . Por ello, resultaría muy útil disponer de fórmulas analíticas que permitan estimar la probabilidad de error del sistema a nivel físico, sin necesidad de simular el sistema completo.

De aquí surge el interés de la presente Tesis Doctoral, cuyo objetivo es el diseño de detectores multivelocidad para comunicaciones móviles de tercera generación. Además del diseño se ha realizado el estudio analítico de los mismos, orientado a obtener expresiones para el cálculo de la probabilidad de error, BER (*Bit Error Rate*) y la relación señal a interferencia más ruido, SIR (*Signal to Interference Ratio*), que van a permitir evaluar de manera eficiente el funcionamiento de los detectores.

1.2. Objetivos

El objetivo fundamental de esta Tesis es el diseño de detectores multivelocidad para comunicaciones móviles de tercera generación. Junto con el diseño, se presenta el estudio analítico de los mismos, orientados a obtener expresiones para el cálculo de la BER y la SIR, que permiten evaluar con eficiencia el funcionamiento de los detectores.

Este objetivo general, se puede desglosar en los siguientes objetivos particulares:

- Modelar de forma matemática la señal UMTS que se quiere detectar, de manera que se pueda utilizar como base para el diseño de detectores adaptados a su forma específica. Para ello, habrá que tener en cuenta los dos códigos superpuestos que la componen así como su característica multivelocidad. En esta Tesis, se va a presentar un modelo matemático de la señal UMTS original y novedoso, en cuanto a que considera todas las características de la señal UMTS, así como a su aplicabilidad a cualquier tipo de señal CDMA, siendo además un modelo sencillo y compacto. Este modelo va a llevar implícita la idea de tratar, como un único código, los dos códigos superpuestos que componen la señal CDMA de cada canal a transmitir en el sistema UMTS, el cual se denominará código conjunto.
- Diseño de un detector monousuario multivelocidad adaptado a la señal UMTS, basado en el correlador. Es importante diseñar y analizar el detector de correlación, ya que proporciona los estadísticos de decisión suficientes sobre los que el resto de detectores diseñados van a trabajar.
- Como mejora a los detectores monousuario, se encuentran los detectores de detección conjunta. Por lo tanto, se va a diseñar un detector de decorrelación y un detector MMSE multivelocidad especialmente adaptados a las características de la señal UMTS. Estos detectores, gracias al modelo de señal, se van a poder formular de forma similar a sus equivalentes monovelocidad, lo cual supone un enfoque novedoso de los mismos.
- Diseñar detectores de cancelación sucesiva de interferencias multivelocidad (SIC). Para ello, en esta Tesis se va a presentar un esquema de SIC, que tenga en cuenta las características multivelocidad de la señal UMTS. A partir de dicho esquema se van a considerar nuevas y diferentes formas de estimar las amplitudes de las señales que se cancelan, así como el orden en el que los usuarios han de ser detectados y cancelados.
- Diseñar detectores de cancelación paralela de interferencias (PIC) multivelocidad y con pesos. Para este tipo de detectores se van a investigar distintas estrategias de

reconstrucción de la señal y de cálculo de los pesos. Dado que la debilidad de estos detectores es la poca resistencia al efecto cerca-lejos, se va a diseñar una forma original de regenerar los canales y calcular los pesos, especialmente adaptada a hacer frente a este problema.

- Realizar el estudio analítico de todos los detectores presentados, para el caso de que se apliquen tanto a sistemas monovelocidad como a sistemas multivelocidad. Este estudio va a permitir: obtener nuevas fórmulas exactas para la evaluación de la probabilidad de error (BER) de los detectores sin necesidad de ser simulados, derivar aproximaciones para las fórmulas de probabilidad de error exactas obtenidas del estudio analítico, cuya evaluación presente baja complejidad computacional, obtener, a partir del mismo estudio analítico, las fórmulas que permitan calcular la relación señal a interferencia más ruido (SIR), de los distintos detectores.
- Comparar los distintos detectores diseñados, tratando de decidir cuál es el más adecuado según el tipo de enlace, carga del sistema y entorno en el que se encuentre el sistema transmisor-receptor.

1.3. Desarrollo

El desarrollo de esta Tesis se ha dividido en siete fases diferenciadas:

a) Modelo de señal

En primer lugar, se desarrolla el modelo de sistema y de señal UMTS en el que se basan los distintos detectores que se desarrollan a lo largo de esta Tesis. Además, se ve como las propiedades de los códigos que componen la señal CDMA, van a influir en el funcionamiento del sistema, ya que determinan la interferencia multiacceso que sufren los distintos canales de transmisión. Por ello, en esta fase, se realiza un estudio de las propiedades de los dos códigos superpuestos de los que se compone la señal CDMA de UMTS.

b) Detección monousuario

De todos los detectores que se pueden utilizar para una señal CDMA, el detector de correlación es el más sencillo. Por ello, en esta segunda fase de trabajo, se desarrolla el detector de correlación multivelocidad para UMTS. Junto con el detector, se realiza un estudio analítico cuyo objetivo es obtener el estadístico de decisión del detector, formulado de tal forma que permita obtener expresiones exactas de la SIR y la BER, así como la obtención de una expresión simplificada para el cálculo de la BER de forma aproximada. Este estudio analítico se realiza tanto para el caso monovelocidad como para el multivelocidad, considerando señales sincronas y asíncronas.

c) Detección conjunta

Dado que el detector de correlación está muy limitado por la interferencia multiacceso, en esta fase se inicia el estudio de detectores multiusuario de detección conjunta. Dentro de este grupo de detectores se estudian el decorrelador y el MMSE, adaptados a las características de la señal UMTS. Para estos dos detectores se realiza su estudio analítico de manera que se obtienen expresiones de la SIR, la BER y la BER aproximada para la señal multivelocidad. Estas dos técnicas de detección consiguen reducir mucho el efecto de la MAI, aunque su comportamiento en muchos casos se aleja del óptimo, además de presentar cierta complejidad de implementación.

d) Detección por cancelación sucesiva

En ese camino de encontrar detectores sencillos cuyo comportamiento se acerque lo más posible al óptimo, aparecen los detectores de cancelación sucesiva. Esta fase, se va a dedicar a la cancelación sucesiva de interferencias. En primer lugar, se desarrolla una estructura novedosa de detector SIC multivelocidad para UMTS, considerando tanto sincronismo como asincronismo entre canales. A continuación, se realiza el estudio analítico tanto para el caso monovelocidad como para el multivelocidad. Por último, se evalúa en qué orden hay que ir eligiendo los canales a cancelar; así como distintos métodos de realizar la estimación de las amplitudes.

e) Detección por cancelación paralela

Esta fase se dedica a la cancelación paralela de interferencias. En primer lugar, se diseña una estructura novedosa de PIC multivelocidad para señal UMTS síncrona y asíncrona, así como su estudio analítico para el caso monovelocidad y multivelocidad. Dado que el PIC funciona mejor cuando las cancelaciones se realizan de forma parcial, se desarrolla un método para optimizar el conjunto de pesos con los que realizar dichas cancelaciones parciales. También se evalúan las distintas formas con las que se pueden regenerar las señales para su cancelación. Por último, se diseña un detector PIC novedoso, resistente al efecto cerca-lejos (NFR-PIC).

f) Estudio comparativo de los detectores diseñados

Una vez diseñados todos los detectores, en esta última fase se realiza un estudio comparativo de todos ellos. Este estudio se organiza desde el entorno más favorable de funcionamiento para cualquier detector, canal gaussiano, al entorno más desfavorable, canal Rayleigh y efecto cerca-lejos, pasando por todos los casos intermedios.

1.4. Conclusiones

En esta Tesis se han diseñado detectores adaptados a las características especiales que presentan las señales del sistema de tercera generación UMTS. A continuación, se enumeran las principales conclusiones y aportaciones obtenidas en las distintas fases de desarrollo del trabajo:

a) Modelo de señal

- Se ha desarrollado un modelo matemático de señal novedoso válido tanto para el sistema UMTS-FDD como para otros sistemas CDMA multivelocidad.
- Se han estudiado las propiedades de correlación cruzada de los códigos conjuntos de UMTS. Esto ha permitido caracterizar la interferencia multiacceso, comprobándose que el peor caso posible que se le puede presentar a un detector es que los canales estén sincronizados. Igualmente, se ha puesto de manifiesto que no es necesario realizar planificación de códigos de aleatorización cortos para la señal UMTS-FDD de enlace ascendente [Barbancho02].

b) Detección monousuario

- Se ha realizado un estudio analítico del detector de correlación multivelocidad síncrono y asíncrono. La novedad está tanto en la notación utilizada como en su aplicación a una señal CDMA compuesta por dos códigos superpuestos. A partir de este estudio, se han obtenido expresiones exactas para el cálculo de la SIR y de la BER así como una expresión simplificada que permite evaluar la BER de forma aproximada.

c) Detección conjunta

- Se ha demostrado como el decorrelador multivelocidad síncrono [Barbancho04a] y asíncrono se puede formular como el decorrelador convencional, una vez modelada la interferencia multiacceso a partir del modelo de señal. Esto es similar a lo que ocurre con las expresiones de SIR y BER que se han derivado para este detector.
- Se ha desarrollado un nuevo detector MMSE multivelocidad síncrono y asíncrono. Al igual que ocurre con el decorrelador, este detector, gracias al modelo de señal, se puede formular como su equivalente monovelocidad.

d) Detección por cancelación sucesiva

- Se ha propuesto una nueva estructura de SIC multivelocidad síncrono y asíncrono [Barbancho03a]. A diferencia de los esquemas de SIC convencionales, en la estructura aquí propuesta es original tanto la forma en la que se realiza la cancelación, dado que se considera el periodo anterior y siguiente al detectado, como que las cancelaciones no son definitivas hasta que se cancela el periodo siguiente.
- Del estudio analítico tanto del SIC monovelocidad como del SIC multivelocidad síncrono, se han obtenido expresiones originales para la evaluación de la SIR y BER de dichos detectores. Estas expresiones son muy útiles, dado que permiten evaluar el funcionamiento del detector sin necesidad de simular su comportamiento, además de poder utilizarse en algoritmos de control de acceso y control de potencia.
- Se ha comprobado que el mejor criterio de ordenación de los canales a ser cancelados es su BER o, lo que es equivalente, la relación energía por bit a ruido de los canales transmitidos que, a efectos prácticos, se traduce en ordenar la media de la salida de los filtros adaptados. También se ha visto que, cuando la energía por bit de todos los canales es la misma, el mejor criterio es cancelar los canales por orden inverso a su factor de ensanchamiento.

e) Detección por cancelación paralela

- Se ha aportado una estructura de PIC multivelocidad sincrona y asíncrona multietapa con pesos [Barbancho03c]. Para el PIC asíncrono es novedosa tanto la forma en la que se realiza la cancelación, considerando el periodo anterior y siguiente al que se está detectando, como la utilización de una memoria común para todas las etapas.
- Se han obtenido expresiones nuevas para la SIR y BER del PIC multietapa con pesos síncrono, tanto para el caso monovelocidad como para el caso multivelocidad [Barbancho05]. Todas estas expresiones tienen en cuenta toda la información sobre los canales del sistema (amplitud y correlación cruzada de los códigos de los canales) y sobre el detector (número de etapas del PIC y parámetros de cancelación parcial de cada etapa).
- Se ha propuesto una forma de calcular el conjunto de pesos óptimos para el PIC a partir de las expresiones de BER derivadas, que proporciona mejores resultados que los de otras técnicas propuestas en la bibliografía [Divsalar94], [Guo98].
- Se ha desarrollado un nuevo detector PIC multivelocidad, el NFR-PIC, adaptativo y resistente al efecto cerca-lejos [Barbancho04c].

f) Estudio comparativo de los detectores diseñados

- Se ha comprobado como la utilización de configuraciones mejoradas de los detectores, que se adaptan a las condiciones variantes del canal, hacen que se consigan menores probabilidades de error que con las configuraciones convencionales, con independencia del tipo de canal y de la existencia del efecto cerca-lejos.
- Cuando existe control perfecto de potencia, la detección conjunta y la detección por cancelación paralela de interferencias proporcionan unas probabilidades de error reducidas. Sin embargo, la cancelación sucesiva, proporciona peores resultados, ya que no es capaz de separar los usuarios por BER.
- Ante el efecto cerca-lejos, los detectores que mejores prestaciones proporcionan son los de detección conjunta y los de cancelación sucesiva. Sin embargo, el NFR-PIC diseñado, resistente al efecto cerca-lejos, es capaz de conseguir resultados similares con una complejidad menor.

2. ORIGINALIDAD

En esta Tesis Doctoral se han propuesto soluciones originales en el diseño de detectores multivelocidad para comunicaciones móviles de tercera generación.

Las principales aportaciones originales de esta Tesis se pueden concretar en los siguientes puntos:

a) Modelo de señal

- Se ha desarrollado un modelo matemático original válido tanto para el sistema UMTS-FDD como para otros sistemas CDMA multivelocidad. En la bibliografía no se encuentran modelos de señal CDMA que consideren dos códigos superpuestos siendo uno de ellos de longitud variable. Como mucho, se encuentran modelos que consideran códigos de distinta longitud [Chen99], [Saquib99], [Saquib00] o modelos que consideran códigos largos [Torrieri92], [Guo99], [Xiao04].

Es de destacar, además, la naturaleza matricial del modelo de señal que, junto con la notación desarrollada, ha permitido tanto realizar los estudios analíticos de todos los detectores como conseguir que todas las expresiones que se derivan se estructuren de la misma forma.

- En este capítulo también se ha visto como para la señal UMTS-FDD, las características de los códigos de aleatorización cortos hacen que no sea necesario realizar ningún tipo de planificación para su asignación [Barbancho02]. Esto se ha comprobado realizando un estudio de las correlaciones cruzadas que presentan los códigos conjuntos con distintas estrategias de asignación y viendo que los resultados que se obtienen son similares.

En la bibliografía no se encuentran referencias de cómo se hace la asignación de los códigos de aleatorización para enlace ascendente. Lo único que se encuentran son referencias sobre planificación de códigos en el enlace descendente [Kourtis00].

b) Detección conjunta

- El decorrelador multivelocidad síncrono [Barbancho04a] o asíncrono, una vez modelada la interferencia multiacceso a partir del modelo de sistema del capítulo 2, se ha visto como se puede formular como el decorrelador convencional [Lupas90].

Aunque la estructura es igual a la monovelocidad presentada por [Verdu98], gracias al modelo analítico de la señal UMTS, se ha aplicado el decorrelador a una señal multivelocidad que utiliza dos códigos superpuestos.

- Los resultados correspondientes al decorrelador multivelocidad son originales, ya que no se limitan al caso de sólo dos velocidades como los presentados en los decorreladores multivelocidad que aparecen en la bibliografía [Chen99], [Saquib99], [Saquib00].

c) Detección por cancelación sucesiva

- Se ha presentado la estructura del SIC multivelocidad síncrono y asíncrono [Barbancho03a]. Esta estructura es original ya que en la bibliografía los detectores SIC que aparecen son en su mayoría monovelocidad [Patel94], [Seskar98] o como mucho de doble velocidad [Yoo01].
- El SIC multivelocidad asíncrono presentado resulta original en dos aspectos. En primer lugar, por considerar la cancelación no sólo del periodo actual de aleatorización que se está detectando, sino del siguiente, de manera que se elimina la mayor cantidad posible de interferencia. Por otra parte, se presenta la idea de hacer que las cancelaciones sólo sean definitivas cuando se ha cancelado el periodo siguiente para conseguir mejorar la ordenación de los canales. Se ha visto como utilizar cancelación temporal mejora el resultado del SIC asíncrono.
- Se ha realizado el estudio analítico del SIC síncrono monovelocidad obteniéndose con él expresiones de la SIR, de la BER exacta y la aproximada. Estas fórmulas, a diferencia de las que aparecen en la bibliografía [Rasmussen00], [Lai01], tienen en cuenta las características de los códigos exactos que se utilizan en la transmisión y no realizan una aproximación estadística de los mismos.
- El estudio analítico del SIC síncrono multivelocidad, es totalmente original, ya que en la bibliografía no se encuentra ningún tipo de estudio equivalente.
- Dado que la señal UMTS es multivelocidad y con códigos de distinta longitud, se ha comprobado como el mejor criterio de ordenación es la BER [Ren03], [Trajkovic04] o lo que es equivalente, la relación energía por bit a ruido de los canales transmitidos, que se traduce en ordenar la media por periodo de aleatorización de la salida de los filtros adaptados. También se obtiene como resultado que, cuando la energía por bit de todos los canales es la misma, los canales han de seleccionarse por orden inverso del factor de ensanchamiento.
- Se han presentado distintos métodos de estimación de las amplitudes para realizar la regeneración: Estimación directa, Estimación media de la magnitud del filtro adaptado, Estimación de promedio y Estimador α - β . Se ha aportado una comparación entre los distintos tipos de estimación y se ha añadido como novedad a los que aparecen en la bibliografía el Estimador α - β [Barbancho03b].

d) Detección por cancelación paralela

- Se ha presentado la estructura del PIC multivelocidad con pesos síncrono y asíncrono [Barbancho03b]. Esta estructura es original ya que los detectores PIC, que se encuentran en la bibliografía, son en su mayoría monovelocidad [Divsalar98] o no consideran la posibilidad de realizar cancelaciones parciales en las distintas etapas [Kim01].
- Para el PIC multivelocidad asíncrono, se han presentado distintas formas de realizar la cancelación de interferencias: con una memoria por etapa, con una memoria común a todas las etapas o sin memoria, cancelando sólo el periodo considerado. En las dos primeras formas de realizar la cancelación, resulta novedoso que la cancelación se realice considerando no sólo el periodo actual de aleatorización sino el anterior y el siguiente, consiguiendo, por tanto, cancelar la mayor cantidad de interferencia posible. Además, utilizar una memoria común a todas las etapas es una

estrategia totalmente original que proporciona mejores resultados que la utilización de una memoria por etapa y supone un ahorro de memoria.

- En el estudio analítico del PIC síncrono monovelocidad se han obtenido fórmulas originales para el estadístico de decisión, la SIR y la probabilidad de error exacta y aproximada [Barbancho05]. Se ha puesto de manifiesto como estas fórmulas proporcionan resultados más aproximados que las que aparecen en la bibliografía [Kaul94], [Buehrer96].
- Se ha realizado el estudio analítico del PIC síncrono multivelocidad, obteniéndose expresiones para el estadístico de decisión, la SIR, la BER exacta y la aproximada. En la bibliografía no se encuentran estudios analíticos para el PIC con pesos para señal multivelocidad de doble código.
- A partir de las expresiones de la BER para el PIC, se ha aportado un método para calcular el conjunto de pesos óptimos. Se ha demostrado como estos pesos proporcionan mejores resultados que los genéricos derivados en [Divsalar98] o a los calculados mediante el método propuesto en [Guo99] que además de no ser un conjunto ordenado de pesos, pueden llegar a ser complejos.
- Se han comparado distintas formas de realizar la regeneración de los canales: regeneración lineal, con limitador duro y con limitador blando [Barbancho03c]. Al realizar la comparación se ha puesto de manifiesto que la que mejor resultados proporciona es la regeneración con limitador blando, con peso proporcional a la relación señal a ruido del canal a regenerar, tal como se proponía en [Divsalar94], [Divsalar98] para el caso monovelocidad.
- Se ha propuesto el receptor NFR-PIC, adaptativo y resistente al efecto cerca-lejos [Barbancho04c]. Este receptor presenta una función de adaptación original para la regeneración de la señal en cada etapa y el cálculo de los pesos. Este receptor, además de tener una baja complejidad computacional, proporciona buenos resultados incluso cuando el efecto cerca-lejos es muy pronunciado.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral se van a dividir en tres bloques: a) Resultados de investigación, b) Comparación de los detectores, c) Resultados de investigación de ampliación.

a) Resultados de investigación

Al tratarse de un Tesis con un alto contenido en investigación básica aplicada al campo de las comunicaciones móviles, además de por la originalidad de las aportaciones, la mejor forma de medir los resultados es por la calidad y el número de publicaciones que se han derivado de la misma (En el Anexo B se adjunta una copia de las mismas). A continuación, se enumera para cada uno de los bloques de la Tesis, las publicaciones más destacadas de cada uno de ellos.

- **Modelo de señal**

- A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, J.T. Entrambasaguas, "Estimation of the maximum number of users in UMTS-FDD uplink", IASTED Internacional Conference on Advances in Communications, pp. 200-205, Benalmádena (Spain), September 2002.

- **Detección conjunta**

- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, J.T. Entrambasaguas, "Multirate decorrelating detector for UMTS", The 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2004), vol. 2, pp. 469-472, Dubrovnik (Croatia), May 2004.

- **Detección por cancelación sucesiva**

- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, "Multirate SIC receiver for UMTS", IEE Electronic Letters, vol. 39, No. 1, pp. 134-136, January 2003.
- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, J.T. Entrambasaguas, "Multirate SIC receiver with several amplitude estimation methods for UMTS FDD uplink", The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Spring), vol. 3, pp. 1910-1914, Jeju (Corea), April 2003.

- **Detección por cancelación paralela**

- A.M. Barbancho, L.J. Tardón, I. Barbancho, "Analytical performance analysis of the linear multistage partial PIC receiver for DS-CDMA systems", IEEE Transactions on Communications, vol. 53, No. 12 pp. 2006-2010, December 2005.
- A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, "Adaptive multirate near-far resistant PIC receiver for UMTS in Rayleigh fading", Signal Processing, vol. 84, pp. 2443-2447, December 2004.
- A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, "Multirate weighted multistage PIC receiver for UMTS FDD uplink", The 58th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Fall), vol.2, pp. 1070-1074, Orlando (USA), October 2003.

- L.J. Tardón, J. Palacios, I. Barbancho, A.M. Barbancho, "On the improved multistage partial parallel interference cancellation receiver for UMTS", The 60th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2004-Fall), vol.4, pp. 2321-2325, Los Ángeles (USA), September 2004.

b) Comparación de los detectores

Además de los resultados de investigación, en esta Tesis son a destacar los resultados obtenidos de la comparación de los detectores diseñados, dado que son de gran utilidad y de aplicación directa para el diseño de sistemas CDMA de comunicaciones móviles.

- Se ha comprobado como la utilización de configuraciones mejoradas de los detectores diseñadas en esta Tesis, hacen que se consigan menores probabilidades de error con independencia del tipo de canal y de la existencia del efecto cerca-lejos.
- El resultado de aplicar las fórmulas aproximadas para la estima de la BER proporciona un funcionamiento cualitativamente igual al de la simulación de los mismos, pero las probabilidades de error que se obtienen son más elevadas. Con todo, esta diferencia se reduce cuando el sistema tiene muchos usuarios activos con la misma potencia de transmisión, ya que en estas condiciones la aproximación gaussiana es mejor.
- Cuando existe control perfecto de potencia, la detección conjunta y la detección por cancelación paralela de interferencias proporcionan unas probabilidades de error reducidas. Sin embargo, la cancelación sucesiva proporciona peores resultados, ya que no es capaz de separar los usuarios por BER.
- Ante el efecto cerca-lejos, los detectores que mejores prestaciones proporcionan son los de detección conjunta y los de cancelación sucesiva. Sin embargo, el NFR-PIC diseñado resistente al efecto cerca-lejos, es capaz de conseguir resultados similares con una complejidad menor.
- Cuando el canal es Rayleigh, el funcionamiento de los detectores diseñados es peor que para el canal gaussiano, pero su comportamiento relativo es similar.

c) Resultados de investigación de ampliación

A lo largo de la Tesis han ido quedando planteadas preguntas que señalan líneas de investigación. De hecho, muchas de ellas ya se han iniciado y han dado lugar a resultados que se han plasmado en numerosas publicaciones científicas (En el anexo B se adjunta una copia de las mismas). A continuación se enumeran las líneas nuevas de investigación que han surgido de la Tesis, junto con las publicaciones que se han derivado de las mismas.

- **Diseño de sistemas MC-DS-CDMA**

Todos los conocimientos que se han adquirido sobre interferencia multiacceso en sistemas CDMA se pueden aplicar al diseño de sistemas MC-DS-CDMA, de manera que se consiga optimizar el valor de la interferencia multiacceso y dotar al sistema de una gran versatilidad, sin aumentar la complejidad del sistema. En este sentido, ya se han comenzado algunos trabajos como los presentados en:

- I. Barbancho, L.J. Tardón, A.M. Barbancho, "Efficient MC-DS-CDMA transmitter por ICI self-mitigation", IEE Electronic Letters, vol. 42, No. 9, pp. 541-542, April 2006.
- I. Barbancho, L.J. Tardón, A.M. Barbancho, "Code shift for intercarrier interferente cancellation in MC-DS-CDMA", Signal Processing, vol. 84, pp. 2449-2452, December 2004.
- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, A. Peinado, "Multirate MC-DS-CDMA transmitter for 4G communications", The 60th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2004-Fall), vol.2, pp. 904-908, Los Angeles (USA), September 2004.

- **Ampliación de los estudios analíticos**

Los estudios analíticos desarrollados en este Tesis, se pueden ampliar de manera que tengan en cuenta la interferencia inter-celda. Las expresiones que se deriven de estos estudios analíticos serán de gran utilidad en los sistemas de control de acceso y de control de potencia que requieran tener en cuenta las celdas adyacentes. En esta línea de se ha presentado el estudio analítico de la SIR para el detector PIC que considera la interferencia inter-celda.

- A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, "Analytical SIR analysis and preformance evaluation of the PIC receiver in UMTS multi-cell systems", The 63th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2006-Spring), vol. 5, pp.2178-2182, Melbourne (Australia), May 2006.

- **Adaptar los detectores para señales MC-DS-CDMA**

Todas las técnicas de detección presentadas en esta Tesis se pueden adaptar, para señales MC-DS-CDMA, dadas las similitudes en el planteamiento que tienen este tipo de sistemas con el CDMA monoportador estudiado en esta Tesis. En esta línea de trabajo se ha presentado un detector PIC de dos dimensiones adaptado a señales MC-DS-CDMA.

- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, "2D multirate multistage PIC receiver for multicarrier DS-CDMA", The 62nd IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2005-Fall), vol.4, pp. 2321-2325, Dallas (USA), September 2005.

4. APLICABILIDAD

La aplicabilidad de los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral se van a dividir en dos grupos: Aplicabilidad actual y Aplicabilidad futura.

a) Aplicabilidad actual

Los resultados obtenidos en esta Tesis son directamente aplicables en el **dimensionamiento y diseño de sistemas UMTS** como de cualquier otro sistema CDMA. A continuación, se describen de forma detallada las distintas aplicaciones que tienen cada uno de los resultados que se han obtenido.

- **Modelo de sistema**

El modelo matemático de señal novedoso que se ha desarrollado, válido tanto para el sistema UMTS-FDD como para otros sistemas CDMA multivelocidad, se puede aplicar a cualquier señal CDMA, **facilitando todos los estudios** que haya que realizar sobre ellas y permitiendo realizar **comparaciones entre sistemas**.

En cuanto al estudio de las propiedades de correlación cruzada de los códigos conjuntos de UMTS, los resultados que se han obtenido son de aplicación directa en **el diseño** de este tipo de sistemas dado que se ha determinado cual es **el caso peor** de diseño de un sistema UMTS (cuando todos los usuarios estén sincronizados) y se ha demostrado que no es necesario realizar **planificación** para la asignación de códigos de aleatorización cortos.

- **Detección monousuario**

Para este tipo de detector se ha adaptado su estructura a las características de la señal multivelocidad UMTS y se ha evaluado su funcionamiento. Los resultados que se han obtenido de la evaluación del detector se pueden aplicar en la **evaluación del funcionamiento real** de un sistema dado que proporciona **el caso peor** de funcionamiento de un sistema CDMA.

- **Detección por cancelación sucesiva**

La nueva estructura de **SIC** multivelocidad síncrono y asíncrono que se ha propuesto en este Tesis, permite que esta técnica se pueda **utilizar en sistemas UMTS**.

- **Detección por cancelación paralela**

La nueva estructura de **PIC** multivelocidad síncrono y asíncrono que se ha propuesto en este Tesis, permite que esta técnica se pueda **utilizar en sistemas UMTS**. Además, la forma novedosa de calcular el conjunto de pesos óptimos para el PIC, hace que la utilización de esta técnica de resultados cercanos al detector óptimo con una complejidad reducida.

Por otra parte, el detector **NFR-PIC adaptativo y resistente al efecto cerca-lejos**, se puede aplicar a cualquier sistema CDMA que requiera un detector de complejidad muy reducida con buenas prestaciones.

- **Estudios analíticos**

Las expresiones analíticas para evaluar la relación señal a interferencia más ruido (SIR), la probabilidad de error (BER) exacta y la probabilidad de error aproximada, tienen aplicaciones claras en numerosos aspectos de las comunicaciones móviles:

- En los **simuladores de red**: modelado sencillo del nivel físico que, además, incluye el tipo de detector que se desea utilizar
- En **algoritmos de control de potencia y control de acceso**. Estos algoritmos se basan en estimaciones de la SIR que, entre otras cosas, no tiene en cuenta el tipo de detector, por lo que su funcionamiento, en ciertos casos resulta deficiente.
- Para la **determinar la calidad de servicio**. La calidad de servicio a nivel físico en UMTS viene dada, además de por la BER, por el nivel de señal a interferencia requerido. Con las expresiones originales que se han derivado de esta Tesis, es fácil determinar tanto la BER como la SIR y, en consecuencia, la calidad de servicio que se está proporcionando.

- **Comparación de los detectores**

Estos resultados se pueden aplicar para elegir el **detector más adecuado** según el entorno en el que vaya a tener lugar la detección así como según el nivel de complejidad que se requiera en el detector.

- **Diseño de sistemas MC-DS-CDMA**

Las aportaciones que se han derivado de esta Tesis, y tal como se ha expuesto en el apartado de resultados, se pueden aplicar, con ciertas modificaciones, a la nueva tecnología de acceso radio MC-DS-CDMA.

Los resultados obtenidos del modelado del sistema y del estudio de las propiedades de correlación cruzada de los códigos de UMTS, se pueden aplicar en el diseño de estructuras de transmisores MC-DS-CDMA en los que se minimice tanto la interferencia entre portadoras (ICI) como la interferencia multiacceso (MAI).

Además, las estructuras de detectores que se han diseñado en esta Tesis, se pueden adaptar a las señales MC-DS-CDMA, de manera que pueden ser de gran utilidad en los sistemas futuros de comunicaciones, haciendo que muchos de los desarrollos actuales en detectores CDMA que utilicen estas estructuras se puedan reutilizar de una forma sencilla.

Por otra parte, todos los estudios analíticos son adaptables a las características de los transmisores MC-DS-CDMA, permitiendo calcular la BER y la SIR de dichos sistemas en función del tipo de detección que se elija, sin necesidad de simular el sistema completo.

De los estudios preliminares que se han realizado, se ha podido comprobar como las propiedades de los detectores CDMA diseñados, una vez adaptados a la señal MC-DS-CDMA son similares. Por lo tanto los resultados de comparación de los detectores CDMA se pueden utilizar para la elección del tipo de detector para este tipo de sistemas.

ANEXO A: FINANCIACIÓN Y DESARROLLO COMERCIAL

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado dentro del Plan Nacional de I+D+I, por el proyecto:

Título del proyecto: Técnicas adaptativas de transmisión multiportadora y multiplexación por códigos para servicios asíncronos con conexión

Entidad financiadora: C.I.C.Y.T. (TIC 2003-07819)

Duración, desde: septiembre de 2003 hasta: septiembre de 2006

Investigador responsable: J. Tomás Entrambasaguas Muñoz

El desarrollo de esta Tesis dentro de este proyecto ha permitido que parte de la investigación que se ha llevado a cabo sea investigación básica. Este tipo de investigación supone siempre avance en el mundo científico que, a medio plazo, repercute en la investigación aplicada permitiendo que esta progrese de forma rápida y eficaz.

En todos los congresos en los que se han presentado los distintos resultados de este trabajo, ha recibido numerosas felicitaciones por la dificultad del tema tratado y la calidad tanto de los resultados obtenidos como de la exposición de los mismos. De manera similar, los comentarios de los revisores sobre los artículos han sido de alabanza por el trabajo realizado.

Por el momento no se ha generado ninguna patente directamente relacionada con los resultados de esta Tesis. Sin embargo, es de esperar, que sí se hagan de distintos algoritmos de control de acceso y potencia mejorados que utilicen las expresiones de BER y SIR que se han derivado.

En cuanto al desarrollo comercial de las posibles aplicaciones de los resultados todavía no se ha iniciado, pero se espera que en breve se puedan integrar en simuladores comerciales de UMTS, consiguiéndose con ello una mayor eficiencia de los mismos.

ANEXO B: TRABAJOS PUBLICADOS SOBRE LA TESIS

A continuación, se adjuntan todos los trabajos publicados sobre la Tesis. Los trabajos se van a dividir en dos grupos: Publicaciones en revista y Congresos internacionales.

Publicaciones en revista

- A.M. Barbancho, L.J. Tardón, I. Barbancho, “Analytical performance analysis of the linear multistage partial PIC receiver for DS-CDMA systems”, IEEE Transactions on Communications, vol. 53, No. 12, pp. 2006-2010, December 2005.
- I. Barbancho, L.J. Tardón, A.M. Barbancho, “Efficient MC-DS-CDMA transmitter por ICI self-mitigation”, IEE Electronic Letters, vol. 42, No. 9, pp. 541-542, April 2006.
- A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, “Adaptive multirate near-far resistant PIC receiver for UMTS in Rayleigh fading”, Signal Processing, vol. 84, pp. 2443-2447, December 2004.
- I. Barbancho, L.J. Tardón, A.M. Barbancho, “Code shift for intercarrier interferente cancellation in MC-DS-CDMA”, Signal Processing, vol. 84, pp. 2449-2452, December 2004.
- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, “Multirate SIC receiver for UMTS”, IEE Electronic Letters, vol. 39, No. 1, pp. 134-136, January 2003.

Congresos internacionales

- A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, “Analytical SIR analysis and preformance evaluation of the PIC receiver in UMTS multi-cell systems”, The 63th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2006-Spring), vol. 5, pp.2178-2182, Melbourne (Australia), May 2006.
- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, “2D multirate multistage PIC receiver for multicarrier DS-CDMA”, The 62nd IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2005-Fall), vol.4, pp. 2321-2325, Dallas (USA), September 2005.
- L.J. Tardón, J. Palacios, I. Barbancho, A.M. Barbancho, “On the improved multistage partial parallel interference cancellation receiver for UMTS”, The 60th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2004-Fall), vol.4, pp. 2321-2325, Los Ángeles (USA), September 2004.

- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, A. Peinado, “Multirate MC-DS-CDMA transmitter for 4G communications”, The 60th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2004-Fall), vol.2, pp. 904-908, Los Ángeles (USA), September 2004.
- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, J.T. Entrambasaguas, “Multirate decorrelating detector for UMTS”, The 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2004), vol. 2, pp. 469-472, Dubrovnik (Croatia), May 2004.
- A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, “Multirate weighted multistage PIC receiver for UMTS FDD uplink”, The 58th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Fall), vol.2, pp. 1070-1074, Orlando (USA), October 2003.
- L.J. Tardón, I. Barbancho, A.M. Barbancho, J.T. Entrambasaguas, “Channel estimation for downlink UMTS RAKE receivers”, The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Spring), Proceedings, vol. 3, pp. 2110-2114, Jeju (Corea), April 2003.
- I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, J.T. Entrambasaguas, “Multirate SIC receiver with several amplitude estimation methods for UMTS FDD uplink”, The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Spring), vol. 3, pp. 1910-1914, Jeju (Corea), April 2003.
- A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, J.T. Entrambasaguas, “Estimation of the maximum number of users in UMTS-FDD uplink”, IASTED Internacional Conference on Advances in Communications, pp. 200-205, Benalmádena (Spain), September 2002.
- A.M. Barbancho, J.T. Entrambasaguas, I. Barbancho, “CDMA systems physical function level simulator”, IASTED Internacional Conference on Advances in Communications, pp. 61-66, Rodas (Greece), July 2001.

ANEXO C: BIBLIOGRAFÍA

- [Barbancho01] A.M. Barbancho, J.T. Entrambasaguas, I. Barbancho, “CDMA systems physical function level simulator”, IASTED Internacional Conference on Advances in Communications, pp. 61-66, Rodas (Greece), July 2001.
- [Barbancho02] A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, J.T. Entrambasaguas, “Estimation of the maximum number of users in UMTS-FDD uplink”, IASTED Internacional Conference on Advances in Communications, pp. 200-205, Benalmádena (Spain), September 2002.
- [Barbancho03a] I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, “Multirate SIC receiver for UMTS”, IEE Electronic Letters, vol. 39, No. 1, pp. 134-136, January 2003.
- [Barbancho03b] I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, J.T. Entrambasaguas, “Multirate SIC receiver with several amplitude estimation methods for UMTS FDD uplink”, The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Spring), vol. 3, pp. 1910-1914, Jeju (Corea), April 2003.
- [Barbancho03c] A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, “Multirate weighted multistage PIC receiver for UMTS FDD uplink”, The 58th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Fall), vol.2, pp. 1070-1074, Orlando (USA), October 2003.
- [Barbancho04a] I. Barbancho, A.M. Barbancho, L.J. Tardón, J.T. Entrambasaguas, “Multirate decorrelating detector for UMTS”, The 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2004), vol. 2, pp. 469-472, Dubrovnik (Croatia), May 2004.
- [Barbancho04b] L.J. Tardón, J. Palacios, I. Barbancho, A.M. Barbancho, “On the improved multistage partial parallel interference cancellation receiver for UMTS”, The 60th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2004-Fall), vol.4, pp. 2321-2325, Los Ángeles (USA), September 2004.
- [Barbancho04c] A.M. Barbancho, I. Barbancho, L.J. Tardón, “Adaptive multirate near-far resistant PIC receiver for UMTS in Rayleigh fading”, Signal Processing, vol. 84, pp. 2443-2447, December 2004.

- [Barbancho05] A.M. Barbancho, L.J. Tardón, I. Barbancho, “Analytical performance analysis of the linear multistage partial PIC receiver for DS-CDMA systems”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, No. 12 pp. 2006-2010, December 2005.
- [Buehrer00] R.M. Buehrer, N.S. Correal, B.D. Woerner, “A simulation comparison of multiuser receiver for cellular CDMA”, *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 49, No. 4, pp. 1065-1085, July 2000.
- [Buehrer96] R. M. Buehrer, B.D. Woerner, “Analysis of adaptive multistage interference cancellation for CDMA using an improved Gaussian approximation”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, No.10, pp. 1308-1321, October 1996.
- [Chen99] J. Chen, U. Mitra, “Analysis of decorrelator-based receivers for multirate DS/CDMA communications”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* vol. 48, No. 6, pp. 1966-1983, November 1999.
- [Divsalar94] D. Divsalar, M.K. Simon, “Improved CDMA performance using parallel interference cancellation”, *Military Communications Conference (MILCOM’94)*, vol. 3, pp. 911-917, New Jersey (EEUU), Octubre 1994.
- [Divsalar98] D. Divsalar, M.K. Simon, D. Raphaeli, “Improved Parallel interference cancellation for CDMA”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, No. 2, pp. 258-268, February 1998.
- [Guo98] D. Guo, L.K. Rasmussen, S. Sun, T.J. Lim, C. Cheah, “MMSE-based linear parallel interference cancellation in CDMA”, *IEEE 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, vol. 3, pp. 917-921, Sun City (South Africa), September 1998.
- [Guo99] D. Guo, L.K. Rasmussen, T.J. Lim, “Linear parallel interference cancellation in long-code CDMA multiuser detection”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, No. 12, pp. 2074-2081, December 1999.
- [Kaul94] A. Kaul, B.D. Woerner, “Analytic limits on performance of adaptive multistage interference cancellation for CDMA”, *Electronic Letters*, vol. 30, No. 25, pp. 2093-2095, December 1994.
- [Kim01] J.K. Kim, S.K. Oh, M.H. Sunwoo, M.S. Jung, “Multi-rate parallel interference canceller for IMT-2000 3GPP system”, *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2001-Spring)*, vol. 4, pp. 2307-2311,

- Rodas (Grecia), May 2001.
- [Kourtis00] S. Kourtis, "Code planning strategy for UMTS-FDD networks", IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2000-Spring), vol. 2, pp. 815-819, Tokio (Japón), May 2000.
- [Lai01] K.C. Lai, J.J. Shynk, "Steady-state analysis of the adaptive successive interference canceller for DS/CDMA signals", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 49, No. 10, pp. 2345-2362, October 2001.
- [Lupas90] R. Lupas, S. Verdú, "Near-far resistance of multiuser detectors in asynchronous channels", IEEE Transactions on Communications, vol. 38, No. 4, pp. 496-508, April 1990.
- [Melis00] B. Melis, G. Romano, "UMTS W-CDMA: Evaluation of radio performance by means of link level simulations", IEEE Personal Communications, vol. 7, No. 3, pp. 42-49, June 2000.
- [Moreno02] J.A. Moreno, J.L. Miranda, M.A. Díaz, I.E. Barandalla, F.J. Lorca, "Simulador de enlaces para el sistema UMTS en modo FDD", Comunicaciones de Telefónica I+D, No. 24, pp. 121-132, January 2002.
- [Moshavi96] S. Moshavi, "Multi-user detection for DS/CDMA communications", IEEE Communications Magazine, vol. 34, No. 10, pp. 124-136, October 1996.
- [Patel94] P. Patel, J. Holtzman, "Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA system", IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 12, No. 5, pp. 796-807, June 1994.
- [Rasmussen00] L.K. Rasmussen, T.J. Lim, A.-L. Johansson, "A matrix-algebraic approach to successive interference cancellation in CDMA", IEEE Transactions on Communications, vol. 48, No. 1, pp. 145-151, January 2000.
- [Ren03] X. Ren, S. Zhou, Y. Yao, Z. Zhou, "A new successive interference cancellation for asynchronous CDMA", IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2003), vol. 1, pp. 252-256, San Francisco (EEUU), December 2003.
- [Saquib00] M. Saquib, R. Yates, A. Ganti, "An asynchronous multirate decorrelator", IEEE Transactions on Communications, vol. 48, No. 5, pp. 739-742, May 2000.

- [Saquib99] M. Saquib, R. Yates, N. Mandayam, "Decorrelating detectors for dual rate synchronous DS/CDMA system", *Wireless Personal Communications*, vol. 9, No. 3, pp. 197-216, May 1999.
- [Saquib99] M. Saquib, R. Yates, N. Mandayam, "Decorrelating detectors for dual rate synchronous DS/CDMA system", *Wireless Personal Communications*, vol. 9, No. 3, pp. 197-216, May 1999.
- [Seskar98] I. Seskar, K.I. Pederson, T.E. Kolding, J.M. Holtzman, "Implementation aspects for successive interference cancellation in DS/CDMA systems", *Wireless Networks*, vol. 4, No. 6, pp. 447-452, November 1998.
- [Torrieri92] D.J. Torrieri, "Performance of direct-sequence systems with long pseudonoise sequences", *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 10, No. 4, pp. 770-781, May 1992.
- [Trajkovic04] V.D. Trajkovic, P.B. Rapajic, R.A. Kennedy, "A new adaptive ordering method for successive decision feedback multiuser detection", *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2004-Fall)*, vol. 3, pp. 836-840, Houston (EEUU), May 2004.
- [Verdu98] S. Verdú, "Multiuser Detection". Cambridge University Press, 1998.
- [Wijting99] C.S. Wijting, T. Ojanperä, M.J. Juntti, K. Kansanen, R. Prasad, "Groupwise serial multiuser detectors for multirate DS-CDMA", *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 1999-Spring)*, vol. 1, pp. 836-840, Houston (EEUU), Mayo 1999.
- [Xiao04] P. Xiao, E. Ström, "BER performance analysis of multistage PIC scheme in an asynchronous DS-CDMA system with long scrambling codes", *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2004-Spring)*, vol. 2, pp. 952-957, Estocolmo (Suecia), May 2004.
- [Yoo01] D.S. Yoo, W.E. Stark, "Interference cancellation for multirate multiuser systems", *IEEE Vehicular Techonology Conference (VTC 2001-Spring)*, vol. 3, pp. 1584-1588, Rodas (Grecia), May 2001.