

Mecanismos de cancelación de interferencia utilizando detección conjunta en UTRA-TDD

Heiner Castro Gutiérrez*, Carlos Cepeda Castro**,
Humberto Campanella***

Resumen

Las técnicas de Detección Conjunta brindan interesantes e importantes ventajas para los sistemas de telecomunicación de tercera generación basadas en CDMA. Este estudio pretende caracterizar y evaluar mecanismos que permitan incrementar el desempeño de los receptores CDMA mediante la utilización de estrategias de cancelación de interferencias. Esto mediante la utilización de técnicas de Detección Conjunta para los procesos de sincronización y demodulación de usuario en la interfaz radio UTRA en su modo de operación TDD. Se evalúa el rendimiento del sistema mediante curvas de BER vs Eb/Io para distintas condiciones de carga y movilidad. El estudio muestra que las técnicas de Detección Conjunta son aplicables en UTRA-TDD e incrementan notablemente la calidad de los servicios prestados.

Palabras clave: CDMA, UMTS, UTRA-TDD, cancelación de interferencia, detección conjunta, detección de usuario, espectro ensanchado, ortogonalidad.

Abstract

Joint Detection techniques yield important and interesting advantages for third generation telecommunications based on CDMA. This paper evaluates mechanisms to improve CDMA receivers performance by means of interference cancellation using Joint Detection during synchronization and user detection in UTRA-TDD. The system performance is evaluated by BER vs Eb/Io graphics for different load and mobility conditions. Results show that Joint Detection can be applied in UTRA-TDD and the quality of services is incremented.

Keywords: CDMA, UMTS, UTRA-TDD, interference cancellation, Joint Detection, user detection, spread spectrum, orthogonality.

Fecha de recepción: 3 de septiembre del 2001

1. INTRODUCCIÓN

En un sistema de comunicaciones basado en CDMA existen múltiples usuarios, los cuales comparten los recursos de tiempo y frecuencia. Esto es posible gracias a la aplicación de diferentes códigos de *spreading* para cada usuario que se realiza

* Ingeniero Electrónico, Universidad del Norte. (hecastro@unimail.uninorte.edu.co).

** Ingeniero Electrónico, Universidad del Norte.

*** Master en Sistemas y Redes de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid. Ingeniero Electrónico, Pontificia Universidad Javeriana.

durante la generación del enlace descendente. Al aplicar el respectivo código al usuario se forma una señal ruidosa de banda ancha que ocupa gran parte del espectro durante el tiempo que sea necesario. De esta forma, cada usuario contribuye al ruido del sistema, lo cual afecta a todos los demás. Por lo anterior, al momento de hacer la detección y demodulación del usuario de interés se tiene una gran cantidad de interferencias conocidas, lo que degrada en gran manera el desempeño de esta etapa además de limitar la capacidad del sistema.

Este mismo problema surge durante el proceso de sincronización o adquisición en UTRA-TDD, durante el cual distintos canales de tráfico y sincronización se superponen en tiempo y frecuencia. Como es sabido, el mencionado proceso se realiza en tres etapas [1]:

1. Detección del PSCH (sincronización a nivel de slot)
2. Detección del SSCH (sincronización a nivel de trama)
3. Discriminación del código de *scrambling* de la estación base.

En el paso 2 al detectar el SSCH, el PSCH (detectado en el paso 1) no añade información al proceso y, por el contrario, es interferencia para el mismo. La misma problemática se aplica en el paso 3, para el cual tanto el PSCH como el SSCH añaden interferencia y dificultan aun más su realización.

A continuación se describe un sistema diseñado para cancelación de interferencias mediante la peraciónn de un esquema de Detección Conjunta para los procesos antes mencionados en la interfaz UTRA en su modo de realización TDD.

2. MODELO DEL SISTEMA

La señal CDMA recibida es modelada como la superposición de K señales moduladas digitalmente que llegan al receptor simultáneamente luego de pasar por un canal *Rayleigh Fading* selectivo en frecuencia. El tiempo de coherencia del canal se supone mucho mayor que la duración de símbolo, de tal forma que las características del mismo permanecen constantes durante este intervalo de tiempo. Además se asume que el ancho de banda W asignado a los códigos de *spreading* es mucho mayor que el ancho de banda de coherencia del canal. De esta forma, la señal que llega al receptor puede representarse por:

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \left[b_k \sqrt{w_k} \sum_{i=0}^{L-1} c_i(t) u_k \left(t - \frac{i}{W} \right) \right] + n(t), \quad \frac{L-1}{W} \leq t \leq T_s \quad (1)$$

Donde b_k , w_k , $u_k(t)$ representan el símbolo transmitido, la energía recibida y el código complejo de spreading para el k -ésimo usuario, respectivamente; los $c_i(t)$ representan los coeficientes del canal y L el número de trayectos en el mismo; T_s es el tiempo de símbolo y $n(t)$ es la componente de ruido aditivo gaussiano blanco. El tiempo entre rayos está dado por $1/W$, que es igual a un tiempo de chip T_c . El símbolo b_k pertenece al conjunto F_k , que por lo tanto es la constelación de señal M-aria para el k -ésimo usuario [3].

El *spreading* de los datos en UTRA-TDD se realiza mediante dos operaciones: *Canalización y Scrambling*. En primer lugar, cada símbolo de dato complejo se ensancha con un código de canalización real de longitud $\{2,4,8,16\}$; en este paso se utilizan códigos OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor). La secuencia resultante es luego multiplicada chip a chip por una secuencia compleja de longitud 16, conocida como *código de scrambling*. Estos procesos se describen detalladamente en [2].

Debido a que el modelo del canal de comunicaciones tiene propiedades de multitrayecto, la señal que recibe el receptor está compuesta por la señal original enviada por el transmisor y versiones desplazadas de ésta, como se puede observar en la ecuación (1), que puede reescribirse como:

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{w_k} b_k h_k(t) + n(t) \quad (2)$$

Donde $h_k(t)$ para el k -ésimo usuario viene dado por:

$$h_k(t) = \sum_{i=0}^{L-1} c_i(t) u_k \left(t - \frac{i}{W} \right) \quad (3)$$

De la ecuación (2) se observa que para el receptor sería igual si los símbolos enviados fueran ensanchados (spreading) por K nuevos códigos (que llamaremos códigos modificados) denotados por $h_k(t)$, ecuación (3). De esta forma, puede establecerse una equivalencia entre la transmisión sobre un canal multitrayecto y un canal gaussiano. Es decir, al utilizar un modelo de canal gaussiano y los códigos modificados $h_k(t)$ en la modulación, la señal recibida $r(t)$ sería igual a la que se obtiene con un modelo de canal multitrayecto utilizando los códigos $u_k(t)$ para realizar el spreading.

3. DETECCIÓN CONJUNTA

Tradicionalmente la detección de señales CDMA se ha realizado mediante el receptor RAKE. Este receptor combina los múltiples trayectos de la señal, asumiendo que los usuarios interferentes no están presentes. Análisis de desempeño asintótico¹ del receptor RAKE han revelado severa degradación del mismo debido a las interferencias de acceso múltiple.

En los últimos años se han desarrollado algunos detectores que realizan la detección conjunta o multiusuario de señales CDMA. Esto es, demodulan varios usuarios simultáneamente. Además, este tipo de detectores pretende realizar cancelación de interferencias utilizando la información detectada para retirar de la señal recibida las señales de los usuarios interferentes.

Entre las técnicas de detección conjunta encontramos la *Detección de Grupo*. Esta es una técnica de detección multiusuario muy interesante, ya que otros detectores multiusuario resultan ser casos particulares de ésta. La detección de grupo provee una aproximación unificadora hacia la detección multiusuario. La idea básica de esta estrategia consiste en hacer una partición de los K usuarios en P grupos distintos y detectar los símbolos de los usuarios en cada grupo, utilizando un detector para cada uno de los P grupos en la partición [3]. De esta forma, un Detector de Grupo realiza la detección conjunta (*Joint Detection*) de la información correspondiente a un grupo determinado de usuarios.

Con el fin de continuar la presente explicación, es necesario definir la siguiente notación:

- Sea $W = \{1, 2, \dots, K\}$, $G, H \subseteq \Omega$, G y H disyuntos. Se denota el complemento de G con respecto a Ω como \tilde{G} .
- Sea el vector X , el vector X_G se obtiene de X conservando los elementos indexados por el conjunto G .
- Sea la matriz M , la matriz M_{GH} se obtiene de M conservando las filas indexadas por el conjunto G y las columnas indexadas por el conjunto H .
- M^* y M^T denotan la compleja conjugada y la transpuesta de M , respectivamente.
- También se define el conjunto F_G , que es el conjunto de todas las combinaciones posibles de símbolos en el grupo G , como:

¹ ZVONAR, Z. y BRADY, D. «Optimum Detection in asynchronous multiple access multipath Rayleigh fading channels», in Proc. 26th Annual Conference on information Sciences and Systems (Princeton University, Princeton, NY, marzo 1992).

$$F_G = \prod_{k \in G} F_k$$

Para ilustrar la notación se plantea el siguiente ejemplo. Sean los conjuntos $\Omega = \{1,2,3,4\}$, $G_0 = \{1\}$, $G_1 = \{2,3\}$, el vector $X = [a \ b \ c \ d]$ y la matriz

$$A = \begin{bmatrix} e & f & g \\ h & i & j \\ k & l & m \end{bmatrix}$$

El vector X_{G_0} será $[a]$ y X_{G_1} será $[b \ c]$. De la misma manera, la matriz $A_{G_0G_1}$ estará definida como $[f \ g]$.

La figura 1 muestra un esquema de detección de grupo para un canal de 4 usuarios divididos en dos grupos. La salida del banco de filtros acoplados, conocida como vector de estadísticas suficientes q , está definida por la ecuación (4), la cual es la entrada a cada uno de los detectores de grupo:

$$q = \int_{(L-1)/W}^T r(t)h^*(t)dt \quad (4)$$

Donde $h(t)$ denota el vector columna compuesto por los códigos $h_k(t)$. Debido a la equivalencia antes mencionada entre un canal multitrayecto y otro gaussiano, se plantea no utilizar los códigos que fueron utilizados en el transmisor para realizar la demodulación o despreading de la señal, sino utilizar los códigos modificados $h_k(t)$, los cuales introducen los efectos del canal Rayleigh Fading selectivo en frecuencia. Es evidente que para utilizar estos códigos modificados debe tenerse una unidad de estimación de canal, la cual se supone realizada. El límite inferior de la integral en la ecuación (4) evita la interferencia intersimbólica, ya que este tipo de interferencia siempre está presente en canales multitrayecto, pero suele ser ignorada para sistemas donde $L/W \ll Tc$ [4]. Debido a que en UTRA/TDD esta relación no se cumple cabalmente, debe ser tenida en cuenta para los procesos de detección de usuario. Para el caso del canal utilizado (cuatro rayos), la relación $(L-1)/W$ es igual a $3Tc$.

Cada detector realiza una transformación lineal para obtener el vector X_G . Este vector, a su vez, es la entrada a un algoritmo de decisión. En síntesis, es posible demostrar que, para modulación QAM y con base en una prueba de máxima verosimilitud, el detector para el grupo G viene dado por la siguiente ecuación (para más detalles ver [3]):

$$\hat{b}_G = \arg \max_{s_G \in \hat{r}_G} \{ 2 \operatorname{Re}(x_G^{*T} A_{GG} s_G) - s_G^{*T} A_{GG} Q_{GG}^{-1} A_{GG} s_G \} \quad (5)$$

Donde $Q = R^{-1}$, $R = \int_{(L-1)/W}^{T_0} h^*(t) h^T(t) dt$, $x_G = Q_{GG}^{-1} [Qq]_G$ y A es una matriz diagonal, cuya diagonal principal son las amplitudes recibidas de los usuarios.

4. CANCELACIÓN DE INTERFERENCIAS APLICANDO DETECCIÓN CONJUNTA

4.1. Proceso de Detección de Usuario

Supóngase que los usuarios son divididos en una serie de P grupos, G_0, G_1, \dots, G_{P-1} . Los usuarios en el grupo G_0 son detectados de acuerdo con (5). Podría diseñarse un mecanismo de cancelación de interferencia utilizando estas decisiones para sustraer la interferencia de acceso múltiple debida a los usuarios en G_0 , de las salidas de los filtros acoplados restantes q_{G_0} . Las estadísticas de decisión resultantes son utilizadas para detectar los usuarios en el próximo grupo asumiendo que la cancelación de interferencias es perfecta. Este proceso (cancelación de interferencias y detección de grupo) se realiza secuencialmente para los usuarios en los grupos G_2, G_3, \dots, G_{P-1} . De esta manera, un detector de grupo determinado saca provecho de las decisiones hechas por todos los detectores previos a él.

Para realizar la cancelación de interferencias previa al detector del grupo G_{p+1} es necesario hacer una transformación lineal sobre la salida del detector del grupo G_p , la cual calcula la interferencia producida por los símbolos de los usuarios no deseados. Llamemos a la salida de este último detector b_{G_p} . Luego, la entrada al detector del grupo G_{p+1} será

$$z = q_{G_{p+1}} - \hat{b}_{G_p} R_{G_{p+1}G_p} A_{G_p G_p} \quad (6)$$

La figura 2 ilustra el esquema de cancelación de interferencia diseñado para el sistema. La partición diseñada es de tres grupos: G_0, G_1 y G_2 . G_0 se define como $\{2, 3, \dots, 8\}$ si el número de usuarios en el slot es mayor que 8; si el número de usuarios es menor o igual a 8, G_0 se define como $\{2, 3, \dots, K-1\}$. G_1 se define como $\{9, 10, \dots, K\}$ si el número de usuarios es mayor que 8; si el número de usuarios es menor o igual a 8, G_1 no está definido. G_2 se define como $\{1\}$ para cualquier caso.

4.2. Proceso de Sincronización

En un principio se había expuesto la factibilidad del uso de técnicas de cancelación de interferencias utilizando detección conjunta para los procesos de sincronización en UTRA/TDD. Sin embargo, análisis posteriores demostraron la inoperancia del esquema para la eliminación de interferencia en estos procesos debido a las siguientes razones:

- El esquema en mención realiza la cancelación de interferencias basándose en el conocimiento de todos los códigos utilizados en un momento dado. Esto es, se deben conocer tanto los códigos que producen interferencia como los códigos que no la producen.
- Durante la realización del segundo paso de sincronización no se conoce cuáles son los tres códigos secundarios presentes. Se tienen 32 combinaciones posibles para el primer caso de sincronización y otras 32 para el segundo caso [2], por lo cual sería inmanejable considerar todas las posibilidades con el esquema planteado.
- La cancelación de interferencias se realiza a nivel de símbolo; esto es, se calcula la interferencia acumulada en todos los chips que lo conforman. Dado que los canales de sincronismo son a nivel de chip y no vienen modulados por algún código de spreading, se concluye que con los algoritmos de detección conjunta no se podría calcular la interferencia de un código sobre otro, ya que estos algoritmos no calculan interferencia chip a chip.

5. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

Para evaluar el desempeño de un sistema de comunicaciones digitales, la medida de interés es la *Tasa de Error de Bit* (BER) en función de la relación energía de símbolo a interferencia, E_b/I_0 . A continuación se presentan los resultados de las simulaciones realizadas sobre el diseño planteado. Se plantean dos escenarios de evaluación: a) condiciones de baja movilidad (velocidad del móvil inferior a 10 Km./h) y b) condiciones de movilidad (velocidad del móvil de 10 a 40 Km./h).

5.1. CASO 1: Condiciones de Baja Movilidad ($v < 10$ Km/h)

Las figuras 3 y 4 muestran las curvas de BER Vs E_b/I_0 para 16 y 8 usuarios, respectivamente, bajo condiciones de baja movilidad. Cada figura muestra tres curvas, etiquetadas de la siguiente forma:

G.D: Representa el comportamiento del esquema de detección conjunta presentado en la figura 2. Para este esquema se supone que se conocen cuántos usuarios coexisten en un slot de tiempo y cuáles son los códigos utilizados por los mismos.

Fm: Representa el comportamiento del sistema si a la salida de los filtros acoplados a los códigos modificados $h_k(t)$ se utilizara un algoritmo de decisión, para detectar los bits enviados por el usuario de interés.

MF: Esta curva representa el comportamiento de un sistema que realiza la detección de bits a la salida de un filtro acoplado al código de spreading $u_k(t)$ del usuario que se vaya a detectar, el cual es igual al utilizado en la generación del enlace descendente (detección monousuario).

Para cada grupo de curvas podemos obtener la ganancia que genera el uso de G.D sobre los otros esquemas. Esta ganancia se define como la diferencia entre las relaciones E_b/I_0 entre dos curvas para un BER dado. Por ejemplo, para la figura 3 (16 usuarios) tenemos una ganancia de 3.5 dB de G.D sobre las curvas MF y Fm, para un BER de 10^{-3} . De la misma manera, en la figura 4 (8 usuarios) se puede encontrar una pequeña ganancia de Fm sobre MF de unos 0.5 dB para BER mayores que 10^{-3} , lo que evidencia una mejora de Fm sobre MF para un reducido número de usuarios, ya que para 16 usuarios (carga completa) estas dos curvas son prácticamente iguales.

El desarrollo del proyecto abarcó otras simulaciones, cuyos resultados más importantes se resumen en la tabla 1. Este análisis muestra cómo la ganancia de G.D sobre los demás sistemas disminuye a medida que el número de usuarios decrece. Este resultado se debe a que la detección por parte de los esquemas que no utilizan cancelación de interferencia mejora al existir menos interferencia en el sistema.

5.2. CASO 2: Condiciones de Movilidad ($v > 10\text{Km/h}$)

Para este caso se analizan los mismos esquemas que en el numeral anterior y se etiquetan de la misma forma. Se evaluó el sistema para velocidades de 10, 20, 30, 40 y 50 Km/h y distintas condiciones de carga. La figura 5 muestra las curvas obtenidas para 16 usuarios para un nivel de $E_b/I_0 = 5$ dB. El desarrollo del proyecto abarcó la simulación de otras condiciones de carga, pero los resultados obtenidos fueron muy similares a lo observado en la figura 5, por lo cual no se presentan en este artículo.

Las pruebas llevadas a cabo muestran una convergencia entre los tres esquemas evaluados para altas velocidades, es decir, la probabilidad de error para velocidades superiores a los 20 Km/h es aproximadamente la misma para todos los esquemas simulados. Las simulaciones realizadas muestran también la ganancia que tiene G.D sobre los demás esquemas bajo estudio para velocidades inferiores a los 10 km/h.

CONCLUSIONES

Luego de realizar este proyecto se concluye que:

- Los esquemas de cancelación de interferencia utilizando detección de grupo se aplican perfectamente a servicios basados en tecnologías WLL (*Wireless Local Loop*), es decir, a aplicaciones de baja movilidad con velocidades inferiores a 10 Km/h. De la misma forma, observamos que para aplicaciones con movilidad se degradan fuertemente, al incrementarse la velocidad del móvil.
- Debido a la capacidad de detección multiusuario de los esquemas de detección conjunta es posible asignar múltiples códigos a un mismo usuario, ya que el receptor sería capaz de detectar en paralelo la información de un mismo usuario que ha sido ensanchada por distintos códigos de *spreading* pero que coexisten en mismo *time slot*. De esta manera puede incrementarse el grado de servicio a un usuario cuando existe poco tráfico en el sistema.
- No se justifica la utilización de los esquemas de detección de grupo como mecanismo de eliminación de interferencia en los procesos de sincronización, ya que la complejidad computacional que implica la utilización de dichos métodos es muy grande.

Los estudios posteriores que se realicen sobre estos tópicos realizarán:

- Un estudio más profundo sobre el efecto Doppler y su influencia sobre la detección de grupo presentada. Con el objetivo de aplicar mecanismos de corrección de fase para mejorar el rendimiento del detector de grupo en condiciones de movilidad.
- Un estudio posterior debe incluir la optimización del esquema planteado. Búsqueda de la configuración ideal para el número de detectores de grupo que se vaya a utilizar, de manera que el número de operaciones sea disminuido. Llevar a cabo estudios para diseñar las configuraciones de usuarios óptimas en los detectores de grupo, de manera que el desempeño del sistema sea optimizado.
- Caracterización del esquema planteado para la detección multiusuario, con el fin de evaluar el desempeño y viabilidad del esquema, en términos de los recursos *hardware* y *software* necesarios para el desarrollo del sistema.

Referencias

- [1] CAMPANELLA, H. Problemáticas en la recepción del Enlace Descendente en UTRA-TDD, *Ingeniería y Desarrollo*, N° 7, 2000, p. 1-13.
- [2] 3GPP Technical Specification 3G+TS+25.223: «Spreading and modulation (TDD)». URL: <http://www.3gpp.org>. Enero 2001.
- [3] VARANASI, M. Group Detection for Synchronous Gaussian Code-Division Multiple-Access Channel, *IEEE Transaction on Information Theory*, Vol. 41 N° 4, 1995, pp. 1083-1096.
- [4] VARANASI, M. Paralell Group Detection for Synchronous CDMA Communication Over Frequency-Selective Rayleigh Fading Channels, *IEEE Transaction on Information Theory*, Vol. 42, N° 1, 1996, pp. 116-128.
- [5] VITERBI, A. *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communications Systems*. Addison-Wesley, 1995.

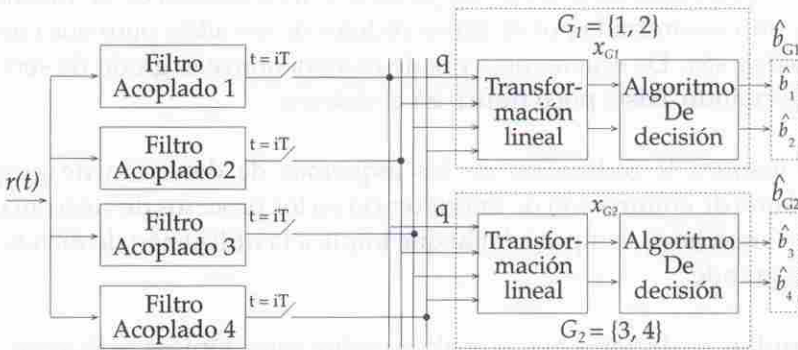


Figura 1

Detección de Grupo: Un banco en paralelo con dos grupos de detectores para cuatro usuarios de un canal CDMA con $G_1=\{1,2\}$ y $G_2=\{3,4\}$ [3]

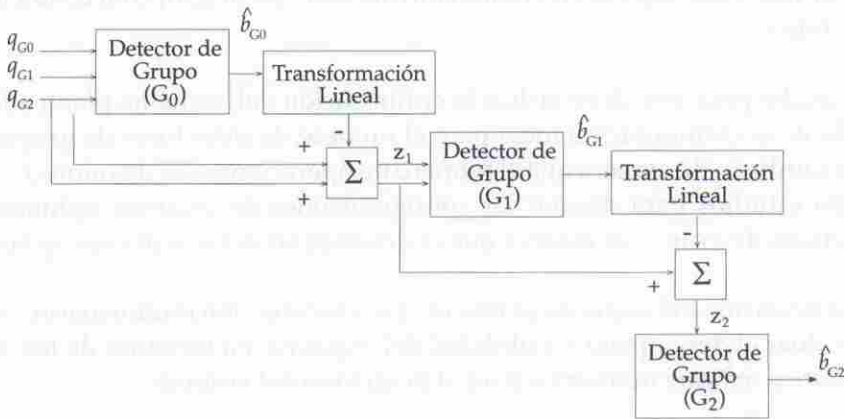


Figura 2

Cancelación de Interferencias utilizando Detección Conjunta: *Detección en grupo secuencial para una partición en tres grupos G_0, G_1 y G_2* [3]

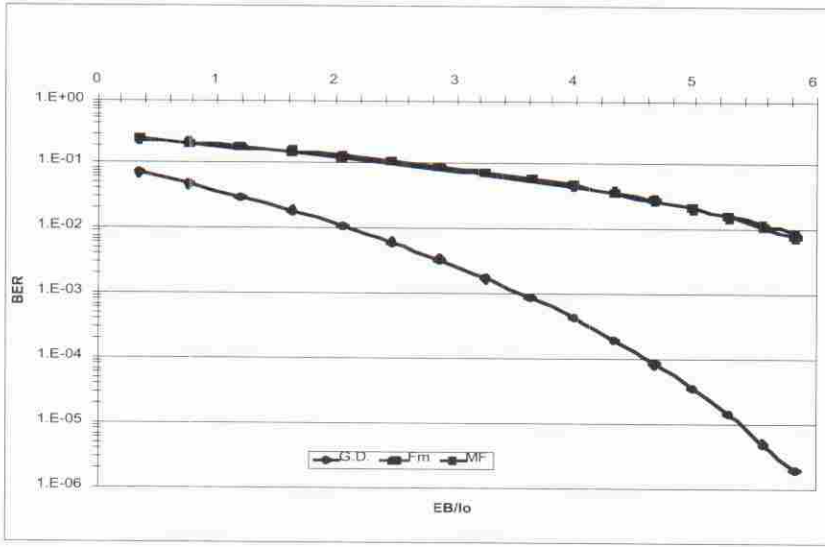


Figura 3

BER vs E_b/I_o para 16 usuarios: Comparativo entre Detección de Grupo (G.D.), Decisión a la salida de los filtros acoplados (Fm) y Detección Monousuario (MF). Obsérvese el rendimiento superior de G.D.

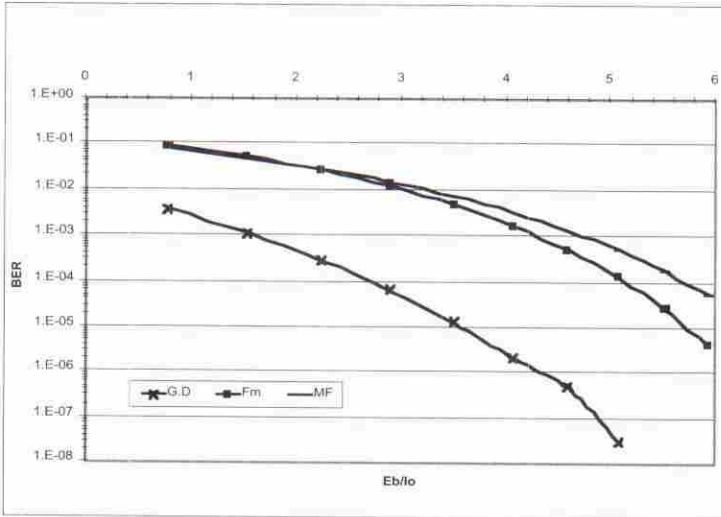


Figura 4

BER vs E_b/I_o para 8 usuarios: Comparativo entre Detección de Grupo (G.D.), Decisión a la salida de los filtros acoplados (Fm) y Detección Monousuario (MF). Obsérvese el rendimiento superior de G.D.

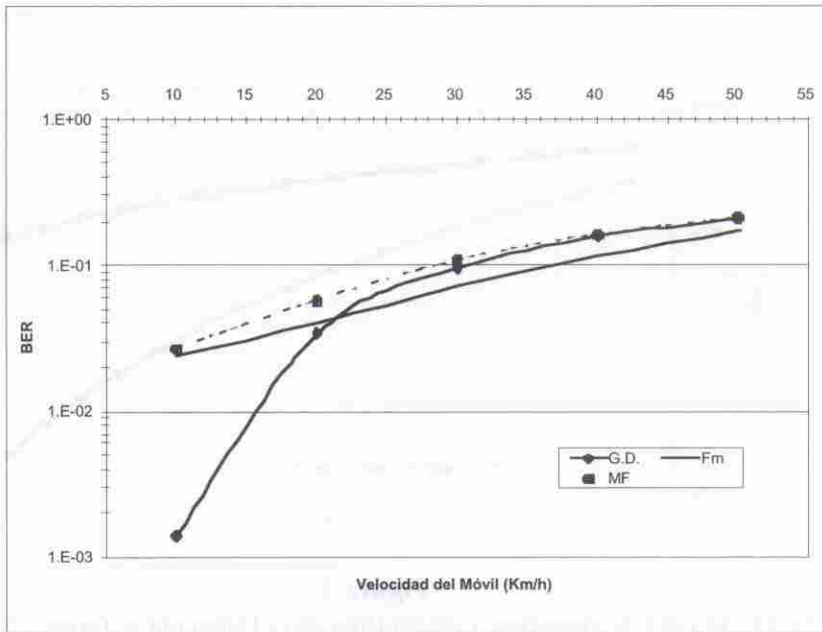


Figura 5

BER Como Función de la Velocidad del Móvil para 16 Usuarios cuando $E_b/I_0=5\text{dB}$. Comparativo entre Detección de Grupo (G.D.), Decisión a la salida de los filtros acoplados (Fm) y Detección Monousuario (MF). Obsérvese el rendimiento superior de G.D a bajas velocidades (<20 km/h)

Tabla 1

Ganancia obtenida por la inclusión de Group Detection: Comparativo entre Detección de Grupo (G.D.), Decisión a la salida de los filtros acoplados (Fm) y Detección Monousuario (MF)

No de Usuarios	Ganancia de GD sobre Fm y MF
16	3.5 dB
14	3.5 dB
12	3.0 dB
10	3.0 dB
8	3.0 dB
6	1.7 dB