

TASA ÓPTIMA DE CODIFICACIÓN EN SISTEMAS CDMA

Oriol Sallent, Antonio Gómez
Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions
Universitat Politècnica de Catalunya
C/ Jordi Girona, 1 - 08034 Barcelona - Spain
E-mail : sallent @ tsc.upc.es

Resumen.- Ante el papel relevante que están tomando los sistemas de comunicaciones móviles que emplean CDMA como técnica de acceso múltiple, esta comunicación se centra en el estudio de las particularidades que incorpora la transmisión en espectro ensanchado sobre los esquemas de codificación de canal. En particular, se intenta identificar una tasa óptima de codificación para distintas situaciones del sistema: con tráfico de voz o datos, control de potencia en lazo abierto o cerrado, operación en una célula aislada o en un entorno celular, etc. Se encuentra que dichas tasas óptimas son muy similares en todos los casos, de manera que puede evitarse el establecimiento de mecanismos de codificación adaptativos para acomodarse a distintas situaciones de operación del sistema.

1.- INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones móviles basados en CDMA se presentan como una solución prometedora para gestionar la creciente demanda de transmisión por paquetes, impulsada en gran medida por el asombroso crecimiento experimentado durante los últimos años en los mercados de Internet y los WWW. Los sistemas CDMA podrían a su vez beneficiarse de las ventajas que esta técnica de acceso múltiple proporciona en términos de flexibilidad, robustez a interferencias indeseadas y facilidad natural de integración de distintos servicios. Esta última característica es altamente deseable en los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, puesto que la continua evolución de las aplicaciones demandadas genera incertidumbre acerca de los servicios que van a tener que soportarse, ante lo cual la solución más acertada es escoger una estrategia de acceso suficientemente flexible como para poder acomodar nuevos servicios y aplicaciones que vayan surgiendo sin necesidad de realizar grandes cambios a nivel de protocolos y equipamientos. De hecho, CDMA emerge claramente como la tecnología dominante en los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, reflejado en la propuesta UTRA de ETSI [1], WCDMA de ARIB [2] o cdma2000 de TTA [3].

Por otra parte, la adversidad de la propagación en un entorno móvil impone la necesidad de proteger la información cuando ésta es transmitida por el canal. Las técnicas más comunes para garantizar la integridad de la información son las llamadas FEC (Forward Error Correction) y ARQ (Automatic Repeat reQuest). Las estrategias FEC consisten en añadir redundancia a la información útil de usuario para proporcionar una cierta capacidad correctora de errores en recepción. Las estrategias ARQ se fundamentan en la retransmisión de aquellos paquetes que contienen errores. Puesto que FEC ofrece una fiabilidad limitada, suele considerarse conjuntamente con ARQ para mejorar la fiabilidad y garantizar que la información que se pasa a capas superiores está libre de errores. La porción FEC, mediante la corrección de tantos bits erróneos como le es posible, reduce la frecuencia de las retransmisiones ARQ.

Es bien sabido que en los sistemas de espectro ensanchado, entre los que se encuentran los sistemas CDMA, el uso de técnicas FEC no requiere la ocupación de ancho de banda adicional. Estudios anteriores sobre sistemas de espectro ensanchado ya demostraron ventajas significativas del uso de codificación de canal en estos entornos [4, 5], traducidos en una mejora de la capacidad del sistema. Esta ganancia derivada del uso de codificación de canal puede explicarse teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) El parámetro básico en un sistema CDMA es la ganancia de procesamiento, G_p , que por un lado mide el grado de ensanchamiento espectral de la señal CDMA (el sistema CDMA ocupa G_p veces más banda de la que sería estrictamente necesaria para transmitir la información de usuario), y al mismo tiempo representa el grado de protección que proporciona el sistema a las interferencias que le originan los demás usuarios (cuanto mayor sea G_p más interferencia o, lo que es equivalente, usuarios, pueden soportarse).
- 2) Definiendo una ranura temporal para la transmisión de T_s s en la que se envían k bits de información de usuario y $(L-k)$ bits de redundancia, la velocidad de transmisión por el canal será $R_b=(L/ T_s)$ bits/s mientras que la velocidad de transmisión de información de usuario vendrá dada por $r_b=(k/ T_s)$ bits/s. Entonces, para un código de tasa $r=(k/L)=(r_b/R_b)$, la ganancia de procesamiento efectiva será $G_p'=G_p \cdot r$, donde G_p representa la ganancia de procesamiento que se obtiene cuando no se utiliza codificación de canal ($L=k$), poniendo de manifiesto que la redundancia puede incorporarse sin penalización en términos de ancho de banda ocupado sino sólo en términos de una reducción en la ganancia de procesamiento. Para un cierto ancho de banda disponible, BW , $G_p=(BW/ r_b)$ y $G_p'=(BW/ R_b)$. Nótese que la velocidad de transmisión de información de usuario es la misma (k bits por slot temporal) con independencia de si se incorpora o no codificación de canal.
- 3) Por lo tanto, aparece un compromiso entre el grado de redundancia añadida y la ganancia de procesamiento efectiva, tal y como refleja la Figura 1. En caso de no utilizar codificación de canal se tiene una cierta tasa de error a la entrada del receptor P_b , que será la misma que se obtiene a la salida P_e , ya que el receptor no corrige errores. En caso de utilizar codificación de canal, la tasa de error a la entrada del receptor p_b será mayor que en el caso de no utilizar codificación debido a la menor ganancia de procesamiento efectiva (menor protección a interferencias). A la salida del receptor, y puesto que este tiene capacidad correctora, la tasa de error p_e habrá mejorado respecto a la entrada. La cuestión está en saber si finalmente p_e es menor que P_e , lo que indicaría que se produce cierta ganancia en las prestaciones derivada del uso de codificación de canal. Se ha demostrado en la literatura que así es, $p_e < P_e$, de modo que los errores que pueden corregirse en recepción superan con creces el mayor número de errores que se presentan a la entrada del receptor debido a la mayor degradación que ocasionan las interferencias.

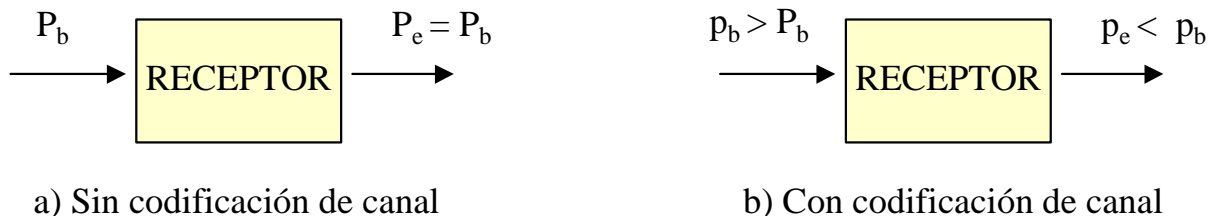


Figura 1. Comparación de las tasas de error con y sin codificación de canal.

Las cuestiones que quedan pendientes, y que ha motivado el trabajo que se presenta en esta comunicación, son las siguientes:

- a) ¿Hay algún límite en la ganancia que proporciona la codificación de canal? o, en otras palabras, ¿Hasta que punto es conveniente reducir la ganancia de procesamiento para seguir incorporando redundancia?
- b) ¿El nivel de redundancia adecuado a añadir depende de diversos componentes del sistema como pueden ser el tipo de tráfico transportado, las condiciones de propagación, las distintas contribuciones de la interferencia que se presentan en un sistema CDMA o el tipo de control de potencia establecido?

Para responder a estas preguntas, esta comunicación intenta identificar una tasa óptima de codificación para distintas situaciones del sistema: con tráfico de voz o datos, control de potencia en lazo abierto o cerrado, operación en una célula aislada o en un entorno celular, etc. Se encuentra que dichas tasas óptimas son muy similares en todos los casos, lo que permite concluir que una vez definida la tasa de codificación óptima el

sistema CDMA proporcionará las mejores prestaciones posibles ante situaciones variantes de operación del sistema, sin necesidad de establecer mecanismos de codificación adaptativos para acomodarse a distintas situaciones de tráfico, servicios o condiciones de propagación.

Basándonos en los comentarios anteriores, el resto de la comunicación se estructura como sigue. En la sección 2 se define el sistema de acceso CDMA. En la sección 3 se presentan los esquemas de codificación considerados, haciendo uso de la cota de Varsharmov-Gilbert. Los resultados obtenidos cubren las secciones 4 y 5, mientras que la sección 6 recopila las conclusiones extraídas.

2.- SISTEMA CON ACCESO CDMA

Se considera un acceso BPSK DS-CDMA y duplexado FDD con ganancia de procesamiento dada por G_p y en el que a cada usuario se le ha asignado su propia secuencia aleatoria. El interés se centra en el enlace ascendente de la comunicación (de móvil a base). El ruido térmico se considera despreciable frente al nivel de interferencia multiusuario. Con el fin de representar la capa física de una transmisión CDMA se hará uso de la hipótesis gaussiana para modelar la interferencia multiusuario [6].

Una transmisión por paquetes CDMA proporciona un multiplexado estadístico natural de distintas fuentes de tráfico, por lo que no son necesarias estructuras complejas de protocolos a nivel MAC (Medium Access Control) para la integración de servicios en modo circuito y en modo paquete. Así, se considerará tanto tráfico con requerimientos de tiempo real (voz) como tráfico más tolerante al retardo (datos, WWW).

En cuanto al tráfico de datos se toman N_d usuarios registrados que generan mensajes con una tasa de llegadas λ y longitud media $(1/\mu)$. Se considera que cada terminal de datos tiene un buffer FIFO con capacidad para almacenar 20 mensajes. Dada la necesidad de absoluta integridad en la información y la tolerancia al retardo de este tipo de tráfico, la codificación de canal FEC se considerará conjuntamente con la estrategia de ARQ Stop and Wait, cuando las retransmisiones de paquetes sean necesarias.

En cuanto al tráfico de voz se considera un modelo clásico, con períodos de actividad y silencio exponencialmente distribuidos y de duración media 1.41 s y 1.74 s respectivamente, resultando un factor de actividad de 0.45. Se toman N_v usuarios. Aunque la principal tarea de la subcapa DLC (Data Link Control) es garantizar la integridad mediante estrategias ARQ, el tráfico de voz no puede aprovecharse de ello a causa de las restricciones en cuanto a retardo máximo tolerable, y por lo tanto los paquetes que se reciban con error se considerarán perdidos. Generalmente se considera que la pérdida del 1% de los paquetes de voz es el límite de calidad aceptable. Para reducir el número de paquetes perdidos debidos a la interferencia multiusuario, la información de voz se protegerá con estrategias FEC.

3.- ESTRATEGIA FEC (FORWARD ERROR CORRECTION)

Considérese un código bloque (L, k) , de longitud total L bits, k bits de información de usuario y capacidad para corregir hasta t errores en recepción. Se hará uso de la cota de Varsharmov-Gilbert con el fin de obtener resultados generales, no dependientes de ningún tipo específico de códigos. Dicha cota viene dada por [5]:

$$2^{L-k} \leq \sum_{i=1}^{2t+1} \binom{L}{i} ; \quad k \geq L - \log_2 \left(\sum_{i=1}^{2t+1} \binom{L}{i} \right) \quad (1)$$

siendo una cota inferior del mínimo número de bits de información, k , que pueden alojarse en un bloque de L bits con capacidad para corregir hasta t errores.

4.- RESULTADOS EN UNA CÉLULA AISLADA

4.1.- Control de potencia en lazo cerrado

En un entorno real, la señal transmitida desde un usuario móvil sufre diversos efectos indeseados en su camino hacia el receptor de la estación base. El llamado shadowing causa desvanecimientos lentos y depende de la forma del terreno así como de la frecuencia. Las reflexiones y el scattering de la señal originan la propagación multicamino y los desvanecimientos de carácter rápido, habitualmente modelados con una estadística Rayleigh. En este contexto, y para el adecuado funcionamiento del sistema CDMA, es primordial establecer un mecanismo de control de potencia para distribuir de manera equitativa los recursos entre los diversos usuarios. En caso contrario una señal reforzada podría enmascarar a otra señal más débil. Un control de potencia idealmente debería mitigar los desvanecimientos del canal, esto es, el terminal móvil debería transmitir en cada momento el nivel de potencia necesario para mantener la potencia recibida en la estación base a un nivel constante. Nótese que para conseguir dicho funcionamiento es necesario un enlace continuo entre el móvil y la base, de manera que el móvil transmite a una cierta velocidad cuando tiene información a enviar y a una velocidad en general mucho más baja cuando el terminal no está activo. Si se asume un control de potencia instantáneo ideal, el canal de comunicaciones puede verse del tipo AWGN. En estas condiciones, la tasa de error se puede calcular con la siguiente expresión [6]:

$$P_b(n) = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_o}}\right); \quad \frac{E_b}{N_o} = \frac{3G_p}{2(m-1)} \quad (2)$$

donde m es el número de usuarios simultáneos. Para un paquete de longitud total L bits y con capacidad de corregir hasta t errores en el receptor, la probabilidad de recibirse correctamente viene dada por:

$$P_c(m) = \sum_{i=0}^t [P_b(m)]^i [1 - P_b(m)]^{L-i} \quad (3)$$

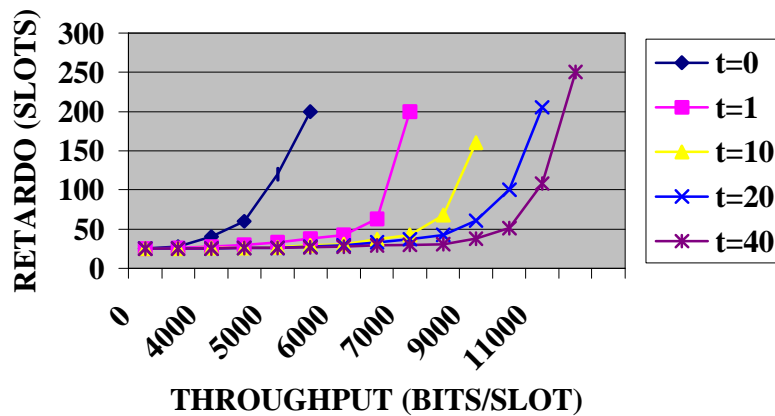


Figura 2. Característica throughput versus retardo para diversas tasas de codificación.

La Figura 2 muestra el comportamiento throughput-retardo obtenido para $N=100$ usuarios, $G_p=63$, $(1/\mu)=10$ Kbits, $k=400$ bits de información útil por paquete y λ variable. A medida que t aumenta se observa una ganancia neta, denotando que la capacidad correctora supera con creces la menor ganancia de procesamiento efectiva. Además, se aprecia una tasa óptima en el sentido que reducir r más allá de un cierto valor no lleva a una mejora de prestaciones, puesto que aparece un efecto de saturación de ganancia. Puesto que se observan ligeras fluctuaciones de comportamiento para valores de r próximos, se ha definido un criterio para determinar la tasa óptima de codificación: aquella tasa de codificación que proporcione un mayor throughput para un nivel de retardo igual al tiempo medio entre llegadas de mensajes (lo cual puede interpretarse como una condición ‘media’ de estabilidad) será la que denominaremos tasa óptima de codificación, si bien dicha tasa debe entenderse más bien como un cierto intervalo alrededor de dicho valor y no como un valor absoluto, ya que las prestaciones varían muy ligeramente alrededor de dicho punto. Esta

última observación es positiva en el sentido que, cuando en el diseño deba escogerse códigos concretos (BCH, Reed-Solomon, etc.) así como un conjunto discreto de tasas de codificación, se sufrirá una muy ligera degradación respecto al caso denominado como óptimo. En el caso de la Figura 2, $t \approx 40$ es el valor óptimo, de manera que la tasa óptima sería $r^* = 0.52$, ya que según la cota de Varsharmov-Gilbert en un paquete de longitud total $L = 768$ bits basta dedicar $(L - k) = 368$ bits de redundancia para poder corregir $t = 40$ errores. Nótese que en este caso el paquete se envía con un ensanchamiento espectral de $G_p' = G_p \cdot r = 63 \times 0.52$.

Uno de los principales requerimientos de los sistemas de comunicaciones móviles futuros es la capacidad de proporcionar un alto grado de flexibilidad en los servicios soportados mediante la definición de velocidades de transmisión variables, incluso a nivel de slot. En este sentido, los sistemas CDMA pueden aprovecharse de la flexibilidad en la utilización del ancho de banda cambiando la velocidad de transmisión a dos niveles distintos: el primero a nivel de introducir redundancia al mismo tiempo que se mantiene la velocidad de transmisión de usuario y el segundo mediante la variación adaptativa de la velocidad de transmisión de usuario cuando ello sea posible (a tal fin se requiere un scheduler en la estación base para decidir la velocidad más adecuada en cada momento y para cada usuario).

En base a los comentarios anteriores, podría resultar adecuado encontrar la tasa de codificación óptima para distintas velocidades de transmisión de usuario soportadas sobre el mismo sistema CDMA. La Tabla 1 resume los valores encontrados para tres velocidades distintas ($2r_b$, r_b and $r_b/2$ bits/s). Se concluye que una tasa $r^* \approx 0.52$ sería adecuada en todos los casos.

	L	k	r^*	t
$r_b/2$	383	200	0.52	20
r_b	768	400	0.52	40
$2r_b$	1464	800	0.54	70

Tabla 1. Tasa óptima de codificación y longitud de los paquetes para distintas velocidades.

4.2.- Control de potencia en lazo abierto

Mientras que un control de potencia en lazo cerrado es más factible en transmisiones de ficheros largos, cuando la naturaleza de la información es de mensajes cortos los overheads necesarios para el establecimiento del control de potencia en lazo cerrado así como el mantenimiento de dicho mecanismo podrían resultar inaceptables. En estas circunstancias resulta de interés estudiar el impacto de un control de potencia en lazo abierto en lugar del teóricamente deseable control en lazo cerrado. El control en lazo abierto puede establecerse haciendo que la estación base transmita una señal piloto de banda ancha que será monitorizada por todos los terminales. Según el nivel con que se reciba dicho piloto el móvil ajusta la potencia transmitida. En este caso pues, la señal recibida en la estación base estará afectada por las fluctuaciones a corto plazo.

Como resultado representativo se considera un desvanecimiento Rayleigh plano, de manera que el control de potencia en lazo abierto es capaz de seguir las componentes de atenuación con la distancia y shadowing, pero la señal recibida está afectada por un desvanecimiento Rayleigh. Nótese que dicha hipótesis, aunque típicamente incorrecta en un sistema de espectro ensanchado porque asume que el ancho de banda de coherencia del canal es superior al ancho de banda de transmisión de la señal expandida, se mantendrá porque en cierto sentido nos llevaría a estudiar el caso peor, ya que un canal selectivo en frecuencia no sufrirá los desvanecimientos profundos que exhibe el canal plano (no selectivo en frecuencia). Entonces, para el usuario i -ésimo se tiene:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i = \frac{g_i}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{2}{3G_p} g_j} \quad (4)$$

donde g es una variable aleatoria con distribución exponencial. La Figura 3, donde de nuevo se ha

considerado $N=100$ usuarios, $G_p=63$, $(1/\mu)=10\text{Kbits}$, $k=400$ bits de información útil por paquete y λ variable muestra una tasa óptima de codificación en torno a $r^*=0.57$ (para $t=30$ y $k=400$, $L=693$). Como era esperable, por comparación con el caso de control de potencia en lazo cerrado se observa una disminución significativa en el throughput debido a los profundos desvanecimientos que se observan sobre la señal útil.

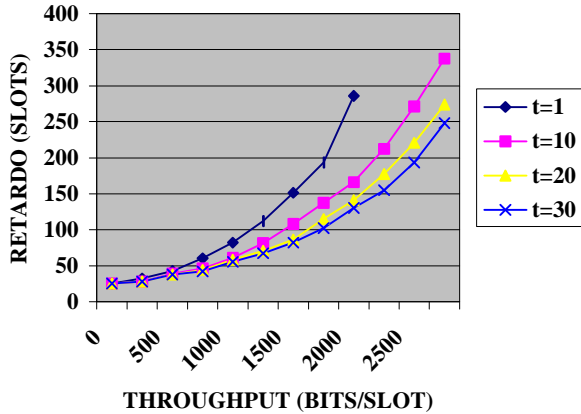


Figura 3. Comportamiento ante un control de potencia en lazo abierto.

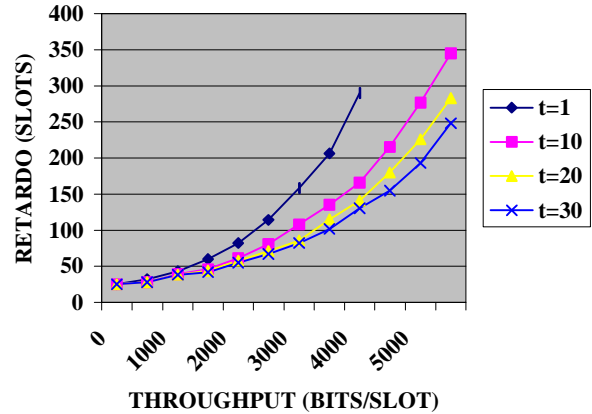


Figura 4. Efecto de la diversidad en espacio de orden dos.

Las técnicas de diversidad se basan en la idea que los errores en recepción ocurren cuando la atenuación del canal es elevada, esto es, el canal se encuentra en un desvanecimiento profundo. Si se es capaz de proporcionar al receptor diversas réplicas de la misma señal de información transmitida sobre canales independientes entre sí, la probabilidad de que todas las componentes se encuentren en desvanecimiento simultáneamente disminuye considerablemente. Por lo tanto, la diversidad espacial puede ser adecuada para reducir los efectos del Rayleigh sobre las prestaciones del sistema cuando este opera en condiciones de control de potencia en lazo abierto. La Figura 4 muestra la ganancia obtenida con diversidad de orden dos y cómo la tasa óptima de codificación se mantiene bajo estas nuevas circunstancias del sistema.

5.- RESULTADOS EN UN ENTORNO CELULAR

Cuando se considera un sistema CDMA con múltiples células, lo cual será lo habitual, la situación resulta más complicada. Básicamente, el nuevo problema a considerar es el nivel de interferencia que originan los usuarios de las células vecinas. Esta interferencia varía no sólo de acuerdo a la atenuación del camino de dicho usuario a la estación base de interés sino también inversamente a la atenuación del camino entre el usuario y su propia estación base, ya que a través del mecanismo de control de potencia puede aumentar o disminuir la interferencia que origina a la célula de interés.

Es bien sabido que el receptor RAKE y otras técnicas son capaces de combatir los desvanecimientos rápidos del canal, reduciendo sus efectos al mínimo [7]. De hecho, la mayor parte de estudios no consideran el efecto de los desvanecimientos Rayleigh, con la presunción de que esta componente estaría eficientemente combatida por el receptor. Por lo tanto, como resultado típico se considerará que la atenuación está afectada por la distancia a la cuarta potencia y una componente log-normal (desvanecimiento lento) de 8 dB. A efectos de simulación se considera una célula de referencia y dos coronas de células vecinas, de manera que hay un total de 18 células interferentes. Al igual que en [8], consideramos la situación en la cual los móviles están siempre enganchados a la estación a la que se presenta una menor atenuación. Bajo esta condición queda garantizado que siempre se cumple, $I(r)/S \leq 1$, siendo $I(r)$ el nivel de interferencia generado por un usuario a distancia r de la célula de referencia y S el nivel de potencia deseado en la estación base, ya que en otro caso se produciría un procedimiento de handover. Así, teniendo en cuenta el efecto de la interferencia intercelular puede reescribirse (1) como:

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_i = \frac{P_{1,i}}{\frac{2}{3G_p} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_1} P_{1,j} \times c_{1,j} + \sum_{k=2}^K \sum_{j=1}^{N_k} P_{k,j} \times c_{k,j} \right]} \quad (5)$$

donde N_m es el número de usuarios registrados en la estación base m y $P_{m,n}$ es la potencia recibida en la estación base de referencia (célula número 1) proveniente del usuario n controlado por la estación base m . $c_{m,n}=1$ si el usuario n controlado por la estación base m está activo en el slot actual y $c_{m,n}=0$ en caso contrario. Además, se asume que el número de usuarios admitidos al sistema, N , es constante, esto es, no se considera ningún tipo de mecanismo de control de admisión. Entonces:

$$N = \sum_{k=1}^K N_k \quad (6)$$

Nótese que debido a los procedimientos de handover N_k puede variar en cada slot. En caso de considerar un control de potencia en lazo cerrado se tiene:

$$P_{1,i} = 1 \quad ; \quad P_{k,j} = \frac{\left[r_{(k,j),k} \right]^m \times 10^{V_{(k,j),k}/10}}{\left[r_{(k,j),1} \right]^m \times 10^{V_{(k,j),1}/10}} \quad (7)$$

siendo $r_{(k,j),k}$ la distancia del usuario j -ésimo a su célula de servicio (k -ésima célula) y $r_{(k,j),1}$ la distancia de este mismo usuario a la célula de referencia. En los siguientes subapartados se pretende cuantificar el efecto de la interferencia intercelular sobre el rendimiento del sistema así como el impacto que tienen los distintos esquemas de codificación de canal.

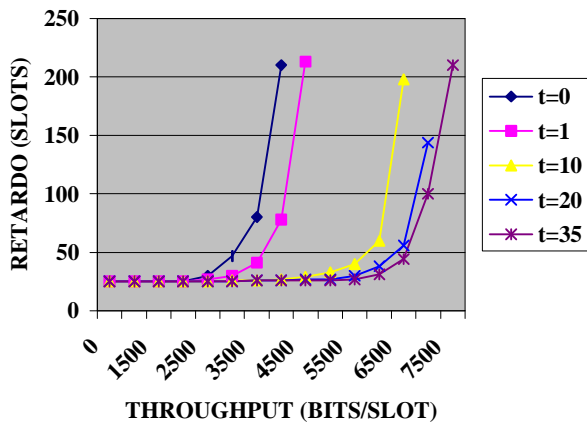


Figura 5. Comportamiento del tráfico de datos en un entorno celular.

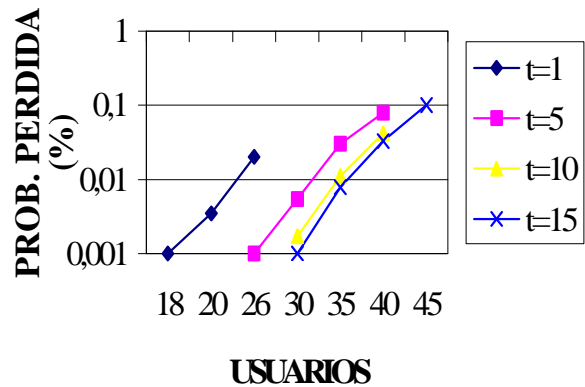


Figura 6. Comportamiento del tráfico de voz en un entorno celular.

5.1.- Tráfico de datos

En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos para los mismos parámetros que en la Figura 2, esto es, $N=100$ usuarios, $G_p=63$, $(1/\mu)=10$ Kbits, $k=400$ bits de información útil por paquete y λ variable. Como era esperable, se observa una significativa reducción en el throughput máximo debido al aumento del nivel de interferencia ocasionado por las 18 células interferentes. Por otra parte, la tasa óptima de codificación en esta caso puede cifrarse en $r^*=0.54$ ($L=731$, $k=400$ y $t=35$), muy similar a la obtenida en una célula aislada. Igualmente, la Tabla 2 recoge el comportamiento para distintas velocidades de transmisión, ratificándose las mismas conclusiones.

	L	k	r^*	t
$r_b/2$	383	200	0.52	20
r_b	731	400	0.54	35
$2r_b$	1387	800	0.57	60

Tabla 2. Tasa óptima para distintas velocidades en entorno celular.

5.2.- Tráfico de voz

En el modelo de voz descrito en la Sección 2 se considera un factor de actividad vocal del 45%. Además, las ráfagas de voz se codifican a 8 Kbps, entregando el codificador un paquete de 160 bits cada 20 ms. La redundancia se añade a estos 160 bits para configurar los paquetes que serán transmitidos por el canal. Dada la condición de transmisión en tiempo real que impone la información de voz, los paquetes de voz que no se reciban correctamente no serán retransmitidos y se considerarán perdidos, estableciéndose el umbral de calidad en una cierta tasa máxima de pérdida de paquetes (habitualmente el 1%). La Figura 6 presenta los resultados obtenidos, considerando una ganancia de procesado $G_p=63$. La tasa óptima de codificación sería aproximadamente $r^*=0.535$, ya que para $t=15$ y $k=160$ resulta $L=299$. Por lo tanto, se mantiene el mismo grado de codificación que en el caso de transportar información de datos.

6.- CONCLUSIONES

Puesto que se prevé que el acceso CDMA tendrán una gran repercusión en los sistemas de comunicaciones móviles futuros, y dadas las particularidades que se derivan del uso de codificación de canal en esquemas de espectro ensanchado, esta comunicación se ha dedicado a estudiar el uso de redundancia en entornos CDMA. Para ello se ha intentado identificar una tasa óptima de codificación para distintas situaciones del sistema: con tráfico de voz o datos, control de potencia en lazo abierto o cerrado, operación en una célula aislada o en un entorno celular, etc. Los resultados obtenidos revelan que dichas tasas óptimas son muy similares en todos los casos, lo que permite concluir que una vez definida la tasa de codificación óptima el sistema CDMA proporcionará las mejores prestaciones posibles ante situaciones variantes de operación del sistema, sin necesidad de establecer mecanismos de codificación adaptativos.

7.- AGRADECIMIENTOS

El trabajo descrito en esta comunicación se ha desarrollado en el marco del proyecto CICYT TIC98-684.

8.- REFERENCIAS

- [1] E. Dahlman, B. Gudmundson, M. Nilson, J. Sköld, "UMTS/IMT-2000 based on Wideband CDMA", IEEE Communications Magazine, Vol 36, nº 9, pp 70 - 80, Septiembre 1998.
- [2] F. Adachi et al., "Wideband DS-SS-CDMA for Next-Generation Mobile Communications Systems", IEEE Communications Magazine, Vol. 36, No. 9, Septiembre 1998, pp.56-69.
- [3] D. N. Knisely, S. Kumar, S. Laha, S. Nanda, "Evolution of Wireless Data Services: IS-95 to cdma2000", IEEE Communications Magazine, Vol 36, nº 10, pp 140 - 149, Octubre 1998.
- [4] M.K. Simon, et al., *Spread Spectrum Communications*, Computer Science Press, EEUU, 1985.
- [5] S. Lin, D.J. Costello, *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, 1983.
- [6] M. B. Pursley, "Performance Evaluation for Phase-Coded Spread-Spectrum Multiple-Access Communication - Part I", IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-25, No. 8, Agosto 1977, pp.795-799.
- [7] C-C Lee, R. Steele "Effect of Soft and Softer Handoffs on CDMA System Capacity", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 47, No. 3, Agosto 1998, pp. 830-841.
- [8] A.J. Viterbi et al., "Soft Handoff Extends CDMA Cell Coverage and Increases Reverse Link Capacity", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 12, No. 8, Octubre 1994, pp. 1281-1287.