

SISTEMAS MULTIAGENTE PARA LA ASIGNACION DE FRECUENCIAS EN REDES CELULARES

Francesc Comellas y Javier Ozón

Departament de Matemàtica Aplicada y Telemàtica
E.T.S.E. de Telecomunicació, Universitat Politècnica de Catalunya
Campus Nord, Edifici C3,c/ J. Girona Salgado 1-3, 08034 Barcelona
tel. 93 401 6009, fax 93 401 5981
comellas@mat.upc.es ozzy@mat.upc.es

Jaime Abril

Airtel Móvil, S.A., Palma de Mallorca, tel. 610 51 9845 jabril@airtel.es

Alejandro Cortés

Corp. Mallorquina del Cable, Ono, Palma de Mallorca, tel. 610 21 2320 cortesa@en.ono.es

Miguel Vaquer

Retevisión Móvil S.A., Amena, Palma de Mallorca, tel. 656 16 1169 Amena16@retemail.es

Resumen.- En este documento se presenta un algoritmo de asignación de frecuencias en telefonía móvil, llamado algoritmo *ants*, que ha demostrado ser más eficaz que métodos clásicos de optimización combinatoria, como el *simulated annealing* o los algoritmos genéticos. El algoritmo puede adaptarse fácilmente a otros problemas de asignación de recursos asociados a telefonía móvil y redes ópticas.

I.- INTRODUCCIÓN

La licencia de explotación del espectro radioeléctrico es uno de los costes principales que debe afrontar un operador de telefonía móvil. De este modo, la reducción del número de frecuencias en el tendido de una red puede suponer un ahorro de inversión considerable. Igualmente, supuesto un espectro fijo, la capacidad de tráfico de una red puede ser aumentada mediante un mejor aprovechamiento de las frecuencias disponibles, en el caso de que una frecuencia pueda reutilizarse en distintos puntos de la red celular.

En los apartados siguientes se describe el esquema de un algoritmo de funcionamiento paralelo, algoritmo *ants*, cuya aplicación al problema de asignación de frecuencias en telefonía móvil ha ofrecido reparticiones más restrictivas que las obtenidas mediante otros algoritmos clásicos de optimización combinatoria, como el *simulated annealing* [3, 6] o los algoritmos genéticos [5, 7], sin aumentar además su complejidad computacional [2]. En estos momentos diversas unidades territoriales de Airtel se estructuran periódicamente a partir del algoritmo *ants*.

II.- EL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

La necesidad de operar con terminales ligeros (lo que se traduce en bajos niveles de potencia y, por tanto, en radios de cobertura estrechos), así como la posibilidad de reutilizar una misma frecuencia en zonas no interferentes y de, en consecuencia, aumentar la capacidad de tráfico, ha llevado a los

operadores de telefonía móvil a emplazar y distribuir geográficamente sus estaciones transmisoras-receptoras a lo largo de redes o mallas más o menos regulares, conocidas como redes celulares.

Una red celular puede describirse matemáticamente mediante un grafo, es decir, un conjunto de nodos unidos entre sí por aristas. Cada arista puede tener asociado un peso o etiqueta (0, 1, 2, etc.). Los nodos del grafo representan, en el contexto de la telefonía móvil, las celdas o los transmisores (en caso de que cada celda disponga de más de un transmisor) de la red celular mientras que los pesos de las aristas indican la separación que deben guardar entre sí, por motivos de interferencias, las frecuencias correspondientes a las celdas o transmisores que conecta cada arista. El coloreado de un grafo es un problema clásico en combinatoria que consiste en asignar colores (esto es, frecuencias) a los distintos nodos de un grafo de modo que la distancia entre los colores de dos nodos (definida como el valor absoluto de su diferencia) sea mayor o igual al peso de la arista que los une. De este modo, la asignación de frecuencias en una red celular puede resolverse coloreando el grafo que representa dicha red.

Un problema de asignación de frecuencias puede caracterizarse a través de una matriz de restricciones y un vector de requerimientos. Cada elemento de la **matriz de restricciones** indica la “separación” que debe existir entre las frecuencias asignadas a la celda fila y la celda columna correspondientes. La calidad del servicio depende en una medida grande de dicha matriz. Así, una restricción mal estimada (un 0 en lugar de un 1) podría provocar una interferencia en el caso de que el diseño final reutilizara la misma frecuencia en las celdas afectadas, ocasionándose de este modo una clara degradación del servicio. El **vector de requerimientos** indica, de otro lado, el número de frecuencias necesarias en cada celda. Esta magnitud depende del índice de población y penetración del servicio, cuota del operador, tráfico medio generado por el usuario en la hora cargada y porcentaje de bloqueo de la red.

III.- ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS *ANTS*.

El problema de coloreado de grafos descrito en el apartado anterior es un problema NP completo; así cuando el orden del grafo aumenta (es decir, cuando aumenta el número de nodos), el tiempo de ejecución de un algoritmo capaz de resolver el problema aumenta de forma exponencial. Esto hace que el problema sea prácticamente irresoluble para redes reales y que en aplicaciones prácticas deban emplearse métodos aproximados, es decir, algoritmos capaces de obtener soluciones próximas al mínimo absoluto en un tiempo de computación razonable.

El algoritmo *ants* es un algoritmo de asignación, basado en la idea de búsqueda paralela, que distribuye un cierto número de agentes (hormigas) a través de los nodos del grafo, coloreándolos conforme a un criterio de optimización local. En cada iteración cada una de las hormigas se desplaza desde el nodo actual al nodo adyacente que incumple más restricciones (esto es, cuya frecuencia es incompatible con un mayor número de frecuencias de transmisores vecinos), y sustituye la antigua frecuencia (o color) del nodo por una nueva frecuencia que minimiza el número de restricciones (véase Fig. 1).

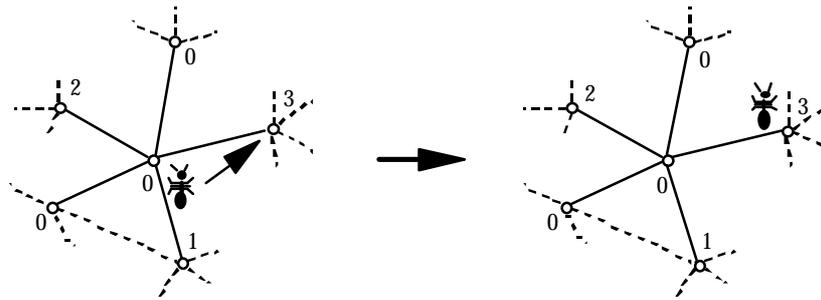


Fig. 1. Movimiento de una hormiga hacia el peor nodo (los números indican el número de restricciones que incumple cada nodo). A continuación la hormiga cambia el color de dicho nodo.

En cada iteración cada una de las hormigas repite el mismo proceso de forma probabilística. De este modo, el agente u hormiga se desplaza al peor nodo adyacente con una determinada probabilidad p_n (en otro caso puede desplazarse a cualquier otro nodo adyacente de forma equiprobable), y le asigna el mejor color con probabilidad p_c (en otro caso puede asignarle cualquier color al azar; ambas probabilidades son parámetros ajustables). Este carácter probabilístico permite al algoritmo escapar de mínimos locales y obtener cotas próximas al mínimo absoluto. El proceso se itera hasta que se obtiene la solución óptima o el algoritmo converge.

Algoritmo ANTS

inicialización

```

situar cada hormiga en un nodo elegido al azar
colorear todos los nodos al azar
para todas las hormigas
  inicializar la función_de_coste_local
final para
inicializar la función_de_coste_global
mejor_coste = función_de_coste_global

```

mientras (*mejor_coste* > 0)

```

para todas las hormigas
  si (random <  $p_c$ )
    ir al peor nodo adyacente
  en otro caso
    ir aleatoriamente a un nodo adyacente
  final si
  si (random <  $p_n$ )
    cambiar el color del nodo al mejor posible
  en otro caso
    cambiar el color del nodo a uno aleatorio
  final si
  para el nodo y sus adyacentes
    actualizar la función_de_coste_local
    actualizar la función_de_coste_global
  final para
  si (función_de_coste_global < mejor_coste )
    mejor_coste = función_de_coste_global
  final para
final mientras

```

De esta forma, y lo mismo que en un hormiguero la coordinación de los distintos individuos, cada uno de características simples, puede dar lugar a una estructura social capaz de llevar a cabo tareas

complejas (como por ejemplo encontrar el camino óptimo entre dos puntos), el funcionamiento en paralelo de agentes o unidades autónomas (pero que de algún modo interactúan) ha permitido al algoritmo *ants* obtener coloreados más restrictivos que los que ofrecen los *algoritmos secuenciales* y otros métodos habituales de optimización combinatoria, como el *simulated annealing* o los algoritmos genéticos.

IV.- APLICACIONES DE ANTS.

El algoritmo se ha utilizado con éxito en la asignación de frecuencias implementado en la aplicación ANTX [1] que ha sido probada en diversas redes GSM (definidas a partir de casos prácticos) logrando, en tiempos de ejecución razonables, soluciones próximas a las cotas inferiores y siempre por debajo de las cotas superiores proporcionadas por los métodos de asignación secuencial. Se han estudiado cinco zonas geográficas diferentes, algunas de ellas para diferentes vectores de requerimiento. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Se muestra, en cada caso, el número de celdas de la red, el número total de transmisores requeridos (1 por celda en los casos 1, 2, 3, 4 y 5 y más de 1 por celda en los restantes), el número medio de vecinos por transmisor (esto es, número medio de restricciones entre un transmisor y el resto, diferentes de 0), la cota inferior calculada y la mejor solución obtenida por los métodos de asignación secuencial [4], la mejor solución obtenida por *ants* que cumple todas las restricciones (sin violación) y una solución que utiliza un número de frecuencias menor que la anterior pero que no cumple todas las restricciones (con violación, entre paréntesis el número de restricciones que no se cumplen). En las dos últimas columnas se proporcionan los mismos resultados obtenidos mediante *simulated annealing* [6].

Nótese el caso 3 II, en el que las hormigas han logrado una solución óptima, esto es, coincidente el número de frecuencias utilizado con la cota mínima hallada, 21. En los casos 2, 3 y 4, la solución obtenida por las hormigas se halla entre las cotas mínimas y los resultados obtenidos con los métodos de asignación secuencial.

Nótese también que a pesar de la gran diferencia en el número de celdas de las redes 1, 2, 3, 4 y 5, el número de frecuencias requerido para satisfacer la demanda de un transmisor por celda apenas varía, estando las soluciones comprendidas entre 16 y 19 colores. Esto se debe a que la complejidad del problema no viene dada por el número de celdas sino por el número medio de vecinos por transmisor. Este se mantiene parecido en los 5 primeros casos, alrededor de 25 vecinos por nodo, de aquí los resultados análogos.

Red	celdas	TRX	vecinos/ TRX	cotas inf/sup	ANTX	ANTX (# viol.)	SA	SA (# viol.)
Red 1	43	43	21.3	14-18	17	16(1)	18	17(1)
Red 2	314	314	26.1	13-19	16	15(6)	16	15(10)
Red 3	45	45	20.2	17-21	18	17(1)	19	18(1)
Red 3b	35	60	27.1	21-23	21	20(1)	21	20(1)
Red 4	99	99	24.1	15-19	17	16(1)	18	17(1)
Red 4b	99	198	54.7	37-44	41	40(2)	40	39(4)
Red 5	90	90	32.3	16-19	18	17(1)	18	17(1)
Red 5b	90	163	39.3	19-22	20	19(1)	19	18(6)

Tabla 1. Resultados obtenidos con el uso de *ants* (ANTX) y *simulated annealing* (SA) para varias redes GSM.

Dada la sencillez de su descripción, la adaptación del algoritmo *ants* a otros tipos de problemas combinatorios no presenta grandes dificultades. En el caso de la asignación de frecuencias pueden,

por ejemplo, tomarse en consideración algunos parámetros tecnológicos así como las propiedades físicas de la red.

De este modo, el empleo del *frequency hopping* (técnica en que los distintos transmisores de una celda intercambian sus frecuencias en cada trama, repartiendo entre los distintos canales el ruido debido a desvanecimientos) hace tolerable la aparición de algunas interferencias débiles y que debido al efecto corrector de la conmutación en frecuencia o *hopping* no van a suponer un grave deterioro del servicio.

De otro lado, el empleo del *hopping sintetizado*, ya establecido en algunas redes europeas de telefonía móvil, permite a cada celda de la red sintetizar cualquier frecuencia portadora y así realizar el *hopping* (o conmutación de frecuencia) con un número no limitado de portadoras. En este caso el diseño o la asignación de frecuencias no consiste, como en el coloreado clásico, en la asignación de frecuencias separadas a cada celda sino en la asignación, dada una celda determinada, de un número variable de frecuencias (teniendo igualmente en cuenta las restricciones debidas a interferencias radioeléctricas). Un modo habitual de resolver este tipo de asignación es el empleo de patrones o grupos de frecuencias que se reparten entre las distintas celdas. Dado que este diseño se realiza por lo común a mano, la ampliación del algoritmo *ants* a una versión capaz de distribuir entre las distintas celdas no ya un número determinado de frecuencias sino grupos variables de frecuencias, podría comportar un ahorro considerable de recursos.

De otra parte, a la hora de describir la red celular de un área determinada, podrían tomarse en cuenta aspectos que, por simplicidad, no suelen considerarse. Así, en vez de tratar el problema desde el punto de vista de un grafo, se podría trabajar con digrafos que modelaran mejor las redes reales, donde las interferencias no son simétricas. Podría considerarse, también, la no uniformidad de la interferencia en el espacio de cobertura, así como la localización de las interferencias débiles en células con una densidad de tráfico baja o con una baja estadística de *hand-overs*.

De este modo, y dada la simplicidad y capacidad de adaptación del algoritmo *ants*, una aplicación más detallada que considerara algunos de estos efectos reales podría proporcionar asignaciones frecuenciales más restrictivas en que se aprovechara mejor el espectro radioeléctrico y se ofreciera, sin afectar al coste, una mayor capacidad de tráfico. Finalmente, y dado que el problema de asignación de frecuencias es un caso particular de asignación de recursos, los algoritmos aquí propuestos podrían ampliarse a otros ámbitos en que apareciera este tipo de problemas, entre ellos el reparto de frecuencias en comunicaciones ópticas o la implementación de tablas de recursos con incompatibilidades.

REFERENCIAS

- [1] J. Abril, F. Comellas, A. Cortés, J. Ozón y M. Vaquer, "A multi-agent system for frequency assignment in cellular radio networks ", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pendiente aceptación, 1999 .
- [2] F. Comellas y J. Ozón, "Graph coloring algorithms for assignment problems in radio networks". In *Applications of Neural Networks to Telecommunications 2*. J. Alspector, R. Goodman and T.X. Brown (Eds.), Lawrence Erlbaum Ass., Inc., Publis., Hillsdale, NJ, pp. 49-56, 1995; ISBN 0-8058-2084-1.
- [3] M. Duque-Anton, D. Kunz y B. Rüber. "Channel assignment for cellular radio using simulated annealing", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 42, pp. 14-21, 1993 .

- [4] A. Gamst, "Some lower bounds for a class of frequency assignment problems", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 35, pp. 8-14, 1986.
- [5] S. Hurley, D.H. Smith y S.U. Thiel. FASoft: "A system for discrete channel frequency assignment", *Radio Science*, vol 32, n. 5, pp 1921-1939, 1997.
- [6] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt y M.P. Vecchi. "Optimization by simulated snnealing". *Science*, vol. 220, pp. 671-680, 1983.
- [7] W.K. Lai y G.G. Coghill, "Channel assignment through evolutionary optimization", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 45, pp. 91-95, 1996.