



(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 302 317**

(51) Int. Cl.:
G08G 1/123 (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(86) Número de solicitud europea: **06380013 .0**

(86) Fecha de presentación : **18.01.2006**

(87) Número de publicación de la solicitud: **1811480**

(87) Fecha de publicación de la solicitud: **25.07.2007**

(54) Título: **Sistema automático de cobro por uso de infraestructuras de circulación basado solo en navegación por satélite de prestaciones garantizadas y método para su análisis y diseño.**

(45) Fecha de publicación de la mención BOPI:
01.07.2008

(45) Fecha de la publicación del folleto de la patente:
01.07.2008

(73) Titular/es: **GMV Aerospace and Defence S.A.**
c/ Isaac Newton, 11 - PTM
28760 Tres Cantos, Madrid, ES

(72) Inventor/es: **Cosmen Schortmann, Joaquín y**
Martínez Olagüe, Miguel Ángel

(74) Agente: **Carpintero López, Francisco**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistema automático de cobro por uso de infraestructuras de circulación basado sólo en navegación por satélite de prestaciones garantizadas y método para su análisis y diseño.

Campo de la invención

La presente invención pertenece al campo de aplicaciones de la navegación por satélite (GNSS) al transporte terrestre y en concreto a lo que comúnmente se conoce por términos en inglés como “*Road Charging*”, “*Road Pricing*”, “*Road User Charging*” (RUC), “*Virtual Tolling*” o “*Electronic Fee Collection*” (EFC), es decir, a sistemas automáticos de cobro por uso de vías de circulación. A lo largo de la presente solicitud de patente se utilizará el término “*Road Charging*”.

La presente invención puede ser aplicada con diferentes propósitos dentro de este campo: peaje automático de autopistas o carreteras, cobro por acceso a perímetros urbanos, cobro por aparcamiento en zonas delimitadas, control de congestión urbana, etc., y en general, a aquellas aplicaciones donde es necesario tener información garantizada de que un vehículo ha utilizado o accedido a una determinada infraestructura de transporte.

Antecedentes de la invención

La idea de utilizar la información de posición de un vehículo obtenida mediante un sistema GNSS de navegación por satélite para determinar la cuantía de un peaje es bien conocida y de hecho aplicada ya operacionalmente en algunos sistemas, aunque en combinación con otras tecnologías distintas a GNSS. El concepto básico consiste en utilizar los datos P-T (posición, tiempo) del vehículo junto con la información geográfica de una infraestructura sujeta a cobro para, dado un criterio o regla de peaje, determinar si el vehículo ha usado o no la infraestructura, y si fuera el caso la propia cuantía del peaje en caso afirmativo. Su implementación requiere de un dispositivo embarcado u OBU (On-board Unit) que incluye un receptor GNSS que proporciona los datos P-T, y un equipo de móvil de comunicaciones de datos con un centro de procesado.

De forma genérica la infraestructura sujeta a cobro puede ser una vía concreta de transporte: carretera, autopista o calle, las vías de transporte dentro de una zona, un aparcamiento, etc. Así mismo el criterio de cobro puede ser de “Importe Fijo”, es decir, se cobra un importe determinado por el uso de la vía o por el acceso a una zona geográfica delimitada por una frontera perimetral dentro de un periodo de tiempo establecido; o puede ser de “Importe Variable”, es decir, se cobra un importe que depende de la “cantidad” de uso que se haga de dicha infraestructura. La “cantidad” de uso puede medirse en función del tiempo de permanencia en la infraestructura o en función de la distancia recorrida dentro de la misma.

En el caso de “importe Fijo” los datos P-T del receptor se usan para detectar (sí/no) si el vehículo ha usado o no la infraestructura bajo cobro en el período de cobro establecido en el criterio.

Las ventajas de este concepto o idea son sin duda enormes. Por una parte, la aplicación de cobros a cualquier infraestructura no requiere del despliegue de costosos equipamientos en los viales y, lo que es más interesante, la flexibilidad del sistema a la hora de definir lo que se cobra y cómo se cobra es completa. Así es posible, por ejemplo, implementar un sistema de cobro perimetral para acceder a las grandes ciudades o cobrar por el tiempo estacionado en dicho perímetro, eliminando en este segundo caso los parquímetros tradicionales. En el caso de carreteras y autopistas el sistema proporciona la posibilidad de cobrar en función del uso (Km. o cualquier combinación que se quiera establecer de distancia recorrida, tiempo empleado, velocidad en el trayecto, paradas, etc.) de las mismas sin necesidad de instalar infraestructura de peaje alguna.

Es decir, el sistema de “*Road Charging*” basado en GNSS determina si se ha usado o no la infraestructura y, por tanto, si hay o no que reclamar un importe al portador del *receptor embarcado u OBU*; por ello, hay dos parámetros esenciales relativos a las prestaciones del sistema de “*Road Charging*”:

- *Disponibilidad de Cobro*: Probabilidad de que dentro del *periodo de cobro* un vehículo que efectivamente ha usado la infraestructura sea detectado por el sistema y, por tanto, cobrado. Este parámetro es esencial para que resulte aceptable al explotador público o privado de la infraestructura.

- *Probabilidad de Cobro Indebido*: Probabilidad de que un vehículo portador del *receptor embarcado u OBU* que no haya usado la infraestructura durante el *periodo de cobro* sea indebidamente detectado por el sistema y, por tanto, cobrado erróneamente. Este parámetro es esencial para los potenciales usuarios y para la credibilidad y viabilidad del sistema, pues:

- por un lado, permite disponer de garantías previas que permitan hacer frente al repudio o reclamaciones indebidas de usuarios que sí han utilizado la infraestructura pero rechazan el pago; y,

- por otro lado, permite acotar el número de reclamaciones justificadas de no usuarios erróneamente cobrados.

Los sistemas actuales basados en GPS no pueden garantizar unas prestaciones mínimas del parámetro de *probabilidad de cobro indebido* puesto que los errores de posición basados en GPS no están acotados, ni el tipo de distribución es conocida. Es importante remarcar que aunque la precisión de la posición basada en GPS es actualmente alta, esto no asegura que no se puedan producir errores grandes de vez en cuando y estos errores podrían traducirse en un cobro indebido. Esto implica que en un futuro en el que el número de vehículos equipados con un OBU aumente y la complejidad de la red de carreteras a la que dicho “Road Charging” aplique se haga más compleja (por ejemplo, con carreteras de distinta tarificación estando muy cercanas) el número de cargos incorrectos aumentará sustancialmente.

Sin embargo, como se verá en la descripción de la presente invención, ésta sí que permite acotar el parámetro *probabilidad de cobro indebido*. Para ello la presente invención se basa en el empleo de un receptor GNSS con garantía de integridad como, por ejemplo, el que se define y describe en la solicitud de patente europea ep 05076289.7, titulada “Method and system for providing GNSS navigation position solution with guaranteed integrity in non-controlled environments”. Dicho receptor embarcado/OBU íntegro, además de proporcionar la información de posición y tiempo, proporciona los siguientes datos adicionales de salida:

- Una *bandera de salud* (“Healthy”/“Unhealthy”). Cuando la *bandera* es “Healthy” el error en la solución de posición en una dirección y sentido cualquiera está acotado superiormente, para esa medida, por una cantidad *RPL* (“Radial Protection Level”) con una probabilidad igual a un valor conocido llamado integridad de la solución de posición proporcionada por el receptor I_{RX} .

- Un *nivel de protección radial* o *RPL* (“Radial Protection Level”), es decir, la cantidad que acota el error en la posición horizontal según una dirección y sentido con una probabilidad igual a I_{RX} , es decir:

$$P(\|\vec{\varepsilon} \cdot \vec{u}\| > RPL) = 1 - I_{RX} \quad (1)$$

siendo $\vec{\varepsilon}$ el vector *error en posición* y $\vec{u}$ un vector unitario cualquiera.

Es importante observar que *RPL* y el comúnmente conocido HPL (“Horizontal Protection Level”) en aviación civil no son exactamente lo mismo. HPL es la cota superior del módulo del error, mientras que *RPL* es la cota superior según una dirección y sentido concreto. Por otra parte HPL está asociado a un valor I_{RX} de probabilidad medida durante un cierto periodo de tiempo que incluye varias medidas mientras que *RPL* se define para una probabilidad I_{RX} asociada a una sola medida.

El documento WO-A-02/101661 describe un sistema de peaje dual para cobrar de forma electrónica los peajes por medio de la determinación de las coordenadas de posición reales de un vehículo, usando una señal de posición GPS. Con el fin de decidir si una ruta recorrida es idéntica a una ruta de peaje, se solapa un polígono de la posición medida sobre el tiempo con un polígono de una carretera de peaje; debido a las imprecisiones de la medida, los polígonos no coinciden exactamente. De esta forma, se mide y se compara el espacio entre los dos polígonos con un valor umbral, y si el espacio es más pequeño que el umbral, se cobra el peaje de carretera. No hay una descripción o alusión para el uso de un nivel de protección radial que tenga que recaer por completo dentro de los límites de un área de peaje.

Descripción de la invención

La invención se refiere a un sistema automático de cobro a un vehículo por uso de una infraestructura basado en localización GNSS de prestaciones garantizadas de acuerdo con la reivindicación 1 y a un método para análisis y diseño de un tal sistema de acuerdo con la reivindicación 12. Realizaciones preferidas del sistema y del método se definen en las reivindicaciones dependientes.

Dentro de este contexto de sistemas de “Road Charging”, el sistema y método de la presente invención introducen una novedad esencial pues permiten garantizar *a priori* las prestaciones del sistema de cobro, y en particular, permiten acotar (inferior y superiormente, respectivamente) los parámetros esenciales de las prestaciones del sistema indicados anteriormente: *disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indebido*.

De hecho, dicho parámetro *probabilidad de cobro indebido* está íntimamente unido a las prestaciones de integridad del receptor embarcado íntegro del sistema, y sin un conocimiento de dichas prestaciones de integridad del receptor no es posible acotarlo.

Un primer aspecto de la presente invención se refiere a un sistema automático de cobro a un vehículo *i* por uso durante un *periodo de cobro* T_c de una infraestructura delimitada por una *frontera* basado en localización GNSS de prestaciones garantizadas, que comprende:

- un receptor embarcado u OBU con integridad en dicho vehículo que además de proporcionar información de posición proporciona información adicional relativa al error que cabe esperar en dicha posición consistente en:

- una *Bandera de Salud* (“Healthy”/“Unhealthy”), cuando la *bandera* es “Healthy” el error en la solución de posición en una dirección y sentido cualquiera está acotado superiormente por la cantidad *RPL* con una probabilidad igual a un valor conocido (I_{RX}), y,

- un *RPL* o *Radial Protection Level*, es decir, la cantidad que acota el error en la posición horizontal según una dirección y sentido con una probabilidad igual a un valor conocido I_{RX} , es decir:

$$P(|\vec{\varepsilon} \cdot \vec{u}| > RPL) = 1 - I_{RX}$$

siendo $\vec{u}$ un vector unitario cualquiera,

El sistema además comprende:

- un módulo de detección que determina que el vehículo está dentro de la *frontera* cuando todos los puntos delimitados de una región comprendida por un círculo de radio *RPL* centrado en dicha posición están dentro de la *frontera*, y

- un módulo de cobro que emplea el resultado del módulo de detección para determinar que el vehículo ha usado la infraestructura durante dicho *periodo de cobro* T_c .

Preferiblemente el sistema automático de cobro usa un módulo de cobro que determina que el vehículo ha usado la infraestructura durante dicho *periodo de cobro* T_c cuando hay un número K de posiciones predefinido para las cuales el módulo de detección ha determinado que el vehículo está dentro de la *frontera*, es decir, para las K posiciones se cumple que una región comprendida por un círculo de radio *RPL* centrado en ellas está dentro de la *frontera* durante T_c , y donde el valor de K se escoge para asegurar que la *probabilidad de cobro indebido*, es decir, la probabilidad de que el vehículo portador del *receptor embarcado* que no haya estado dentro de la *frontera* durante el *periodo de cobro* sea cargado, esté acotada, estando la relación entre K y dicha *probabilidad de cobro indebido* dada por la expresión:

$$P_{mdi} \leq \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{RX})^k \cdot (I_{RX})^{M-k}$$

donde M es el total de muestras independientes tomadas del *receptor embarcado* en el vehículo i durante todo el *periodo de cobro* T_c .

Es decir, la selección del número de posiciones K requeridas proporciona un grado de libertad en el diseño del sistema que permite garantizar el valor de la *probabilidad de cobro indebido*. Este parámetro K también afecta a la *disponibilidad de cobro* de tal forma que valores mayores de K disminuyen la *probabilidad de cobro indebido* y valores más bajos de K mejoran la *disponibilidad de cobro*.

Así el sistema de la invención explota los datos proporcionados por el *receptor embarcado* íntegro, de forma que es posible garantizar unas prestaciones mínimas en el sistema de cobro por uso de vías de circulación, es decir, acotar las prestaciones en términos de *disponibilidad de cobro* y de *probabilidad de cobro indebido*.

Dicho *receptor embarcado* u *OBU* es íntegro preferiblemente implementando el método y sistema de aseguramiento de la integridad que se describen en la solicitud de patente europea EP 05076289.

El sistema automático de cobro de la invención puede ser un sistema de cobro perimetral, estando en tal caso dicha *frontera* delimitada por los puntos de todas las vías de entrada a la zona de cobro a partir del cual se le avisa a un usuario del vehículo que está sujeto a cobro.

También puede tratarse de un sistema automático de cobro por uso de una *vía de circulación*, y dicha *frontera* estaría definida de forma que contiene dicha vía de circulación y no contiene ninguna otra vía de circulación o lugar permitido de paso o de estancia de vehículos, de tal forma que se garantiza que un vehículo es usuario si y sólo si está dentro de la *frontera*.

Puede ser un sistema automático de cobro por uso de una distancia de la vía de circulación, estando dicha distancia calculada en base a la suma de longitudes de tramos de vía en los que se puede dividir ésta de forma que cada tramo no tiene más entrada o salida que sus propios extremos.

Preferiblemente para cobrar debe determinarse el sentido de la vía ha circulado el vehículo, comprobando que se dispone de al menos dos posiciones cuya secuencia en el tiempo define el sentido de circulación, y que cumplen que las regiones definidas por un círculo de radio *RPL* centrado en las mismas tienen intersección nula.

El sistema también contempla la posibilidad de que el cobro dependa del número de veces que el vehículo entra en la infraestructura, en cuyo caso la *probabilidad de cobro indebido*, es decir, la de cobrar por más veces de las que realmente ha entrado, también está acotada.

El cobro puede calcularse en la OBU con datos sobre la *frontera* enviados desde un centro de control.

También puede ser que el cobro se calcule, para distintos vehículos equipados con OBUs, en un centro de control con los datos sobre posiciones, *RPLs* y *banderas de salud* enviados desde cada OBU.

El cobro también puede ser función de otros parámetros conocidos característicos del vehículo (como puede el tipo y peso del vehículo), o del *periodo de cobro* (franja horaria, día de la semana o del año, etc.)

Preferiblemente el sistema incluye un módulo en la OBU que implementa un algoritmo que identifica, para un tiempo igual al *periodo de muestreo*, el instante óptimo del cual se obtiene la muestra (posición, velocidad, *RPL* y *bandera de salud*), siendo el óptimo aquel instante cuya muestra tiene mínimo *RPL* dentro del conjunto de medidas con *bandera de salud* declaradas como “*healthy*”, y donde el valor del *periodo de muestreo* se selecciona como un valor:

- mayor que el *periodo de muestreo* del receptor (típicamente 1 segundo),
- mayor que el tiempo de correlación de las medidas, de tal forma que se garantice que los errores de las muestras no están correlados, y
- menor que un cierto valor que garantice un nivel global de *disponibilidad de cobro*.

Un segundo aspecto de la presente invención se refiere a un método de análisis y diseño de un sistema de cobro de un vehículo o “Road Charging” de prestaciones garantizadas según ha sido definido anteriormente, en el que, dados unos requisitos de prestaciones -*probabilidad de cobro indebido* y de *disponibilidad de cobro*- de dicho sistema de cobro y unas prestaciones del receptor embarcado íntegro, se define la geometría de la infraestructura objeto de cobro. O también el método de análisis y diseño permite analizar, diseñar y prever las prestaciones del sistema de “Road Charging” a partir de la geometría de la infraestructura sujeta a cobro, las prestaciones del receptor embarcado GNSS íntegro y el criterio de cobro.

De acuerdo con la invención, el método de análisis y diseño de un sistema de cobro perimetral a un vehículo o sistema de “Road Charging” perimetral de prestaciones garantizadas según dicho sistema perimetral se define en lo anterior comprende los siguientes pasos:

- obtener un mapa de *prestaciones GNSS* (D_{RX} , I_{RX} , *RPL*), determinando para cada punto interior a la *frontera* y para cada instante de muestreo la probabilidad de disponer de posición marcada como “*healthy*” por el receptor ($D_{RX} = D_{RX}(R_i(t_j^l), t_j^l)$), así como los valores esperados de *RPL* asociados a sus medidas de posición para un cierto valor dado de integridad I_{RX} , de acuerdo a las prestaciones del receptor embarcado GNSS y a las condiciones de visibilidad GNSS;
- obtener un mapa de *disponibilidad de cobro* asociado a cada punto interior e instante de muestreo (p_j), calculándose para cada punto interior e instante de muestreo la probabilidad de que un vehículo situado en dicho punto en ese instante genere una muestra de posición “*healthy*” y que sea detectado por el módulo de detección del sistema, para lo que utiliza el mapa de *prestaciones GNSS* junto con la siguiente expresión de r sobre cada punto interior:

$$p_j = D_{Rxj} \cdot r_j$$

donde:

* $D_{Rxj} = D_{RX}(R_i(t_j^l), t_j^l)$ es la *disponibilidad de posición GNSS* (D_{RX}) en un punto e instante determinado tal y como fue obtenida en el paso anterior; y

* $r_j = r_j(z_{ij})$: es la probabilidad de que un círculo de radio *RPL_{ij}* centrado en $R_{mi}^H(t_j)$ esté dentro de la *frontera*, siendo ésta una función únicamente de la distancia del punto a la *frontera* (z_{ij}) y del valor esperado de *RPL* en el punto;

- crear un universo de *trayectorias* posibles (Tr_i) de acuerdo a los datos de tráfico real disponibles en la infraestructura, estando cada *trayectoria* definida por una secuencia de vectores de posición horizontal que el vehículo describe en la misma y por el dato de frecuencia de suceso de la misma (f_{Tr_i});

- determinar la *disponibilidad de cobro* para cada *trayectoria* (Pd_i), determinando para cada *trayectoria* Tr_i la *disponibilidad de cobro* mediante una formulación que es función únicamente de la cantidad de puntos K que precisa los medios de cobro del sistema, de la *disponibilidad de cobro* en cada punto de la *trayectoria*, del tiempo de decorrelación del error de las posiciones obtenidas por el receptor GNSS, de la disponibilidad GNSS, de la longitud de la *trayectoria* que discurre dentro del perímetro y de la velocidad del vehículo a lo largo de la *trayectoria*;

- determinar la *disponibilidad de cobro* promedio a partir de Pd_i y la frecuencia de suceso de cada *trayectoria* fr_i como:

$$\text{Disponibilidad de Cobro (Promedio)} = \sum Pd_i \cdot fr_i$$

- determinar la *probabilidad de cobro indebido* como:

$$Pmd_i = \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{Rx})^k \cdot (I_{Rx})^{M-k}$$

donde M es el total de muestras generables por el *receptor embarcado* durante todo el *periodo de cobro* T_c ; y

- comprobar si las prestaciones del sistema de “Road Charging” son compatibles con los requisitos de prestaciones del sistema existentes, y de no ser así comprobar si es posible cumplir dichos requisitos modificando K .

Aumentar el valor de K permite para un mismo valor de I_{Rx} reducir la *probabilidad de cobro indebido* a costa de disminuir la *disponibilidad de cobro*. De forma contraria disminuir K mejora la *disponibilidad de cobro* a costa de empeorar la *probabilidad de cobro indebido*.

De acuerdo con otra realización preferida de la invención, el método de análisis y diseño de un sistema de cobro a un vehículo en una *vía de circulación* o sistema de “Road Charging” en una *vía de circulación* de prestaciones garantizadas según dicho sistema se define en lo anterior, permite para un tramo dado de vía de circulación caracterizado por su geometría, en particular longitud L y distancia d entre el *borde* de la *vía* y la *frontera*, y la geometría de su entorno, analizar las prestaciones del sistema en términos de *disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indebido* como función del número de posiciones K requeridas por el módulo de cobro, donde el cálculo de la *disponibilidad de cobro* se realiza usando una aproximación conservadora basada en las siguientes hipótesis:

- el vehículo está siempre dentro de la vía por la que circulan los vehículos y al *borde* exterior de ésta;
- la distancia de ésta a la *frontera* es “ d ” característico de la infraestructura y que consideramos constante en el *tramo*;
- los errores de posición para probabilidades del orden de magnitud de la disponibilidad se pueden acotar de forma conservadora por una distribución Gaussiana de media cero y con una desviación típica calculada como RPL/F siendo F el factor asociada a la probabilidad I_{Rx} de la distribución Gaussiana,

siendo el proceso de cálculo el siguiente:

- a partir del número de vehículos que se mantiene fuera de la vía de circulación (Np) y de un requisito deseado para la *probabilidad de cobro indebido* a MD o más vehículos a lo largo del *periodo de cobro* T_c (PMD) se determina la cota superior admisible de *probabilidad de cobro indebido* para un vehículo que no use la *vía de circulación* mediante:

$$PMD = \sum_{md=MD}^{Np} \binom{Np}{md} Pmd^{md} \cdot (1 - Pmd)^{Np-md}$$

- con el valor de Pmd obtenido y dadas unas prestaciones del *receptor embarcado* en Integridad (I_{Rx}) se determina el número de puntos K del *módulo de detección* del sistema que garantiza la Pmd requerida mediante la expresión:

$$Pmd_i = \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{Rx})^k \cdot (I_{Rx})^{M-k}$$

- con el valor de K resultante, y dado el valor de I_{Rx} y de RPL para el *receptor embarcado*, y un escenario de recepción de señal dado, se construye la familia de curvas del tipo de la gráfica de la Figura 6 mediante la expresión de Pd_i :

$$Pd_i \geq \left[\sum_{k=K}^m \binom{m}{k} (D_{RX} \cdot r)^k \cdot (1 - D_{RX} \cdot r)^{m-k} \right]$$

con

$$r = 1 - I_{RX}; (d = 0)$$

$$r = P(N(0,1) < F \cdot (\frac{d}{RPL} - 1)); (0 < d < 2RPL)$$

$$r = I_{RX}; (d \geq 2RPL)$$

- a partir de dicha familia de curvas se obtiene el número de puntos (m) precisados para garantizar la *disponibilidad de cobro* requerida; y

- dada una longitud L del *tramo* de la *vía de circulación*, una velocidad V del vehículo y un tiempo de decorrelación entre medidas τ_c , se comprueba que el número de muestras de posición disponible $L/(V \cdot \tau_c)$ dentro de la *frontera* es igual o superior al número de muestras necesarias m que resultó del paso anterior; y si no es así, esto significa que no es posible lograr cumplir simultáneamente los requisitos de *probabilidad de cobro indebido* y de *disponibilidad de cobro* para el escenario dado para ningún valor de K .

Este método de análisis y diseño de un sistema de cobro para una *vía de circulación* permite identificar los *tramos de vía* que satisfacen unos requisitos especificados de *disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indebido*.

Preferiblemente el valor de RPL se modeliza como una función conocida de I_{RX} según las características del *receptor*, y la herramienta permite, para un *tramo* dado de *vía de circulación* caracterizado por su geometría, en particular longitud L y distancia d entre el *borde* de la *vía* y la *frontera*, y la geometría de su entorno, y dados unos requisitos de *disponibilidad de cobro* y de *probabilidad de cobro indebido*, determinar el I_{RX} del *receptor* que cumple dichos requisitos.

El método de análisis de la invención permite relacionar las prestaciones del sistema de “*Road Charging*” con los datos del escenario de que se trate y las prestaciones del *receptor*, de forma que se pueden realizar diferentes tipos de análisis asociados al sistema de “*Road Charging*” objeto de la invención:

- *Diseño del Sistema*: ajustando los parámetros de diseño del sistema de “*Road Charging*” o seleccionando adecuadamente los parámetros que definen la geometría de la infraestructura objeto de cobro, de tal forma que se satisfagan las prestaciones de *disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indebido* definidas por el proveedor de la infraestructura (un ayuntamiento, una empresa concesionaria de autopistas, el Estado, etc.).

- *Previsión de Prestaciones*: previendo cuáles serán las prestaciones de cobro del sistema antes de que este entre en funcionamiento y, por tanto, ver si se cumplirán o no los requisitos establecidos sin necesidad de realizar costosos ensayos para acumular estadísticas.

- *Garantía de Prestaciones*: demostrando cuáles son las prestaciones de cobro de un sistema ya operativo, sin necesidad de recurrir a estadísticas sobre operación real durante largos periodos de tiempo y amplios universos de muestreo, ante posibles reclamaciones o repudio de pago.

El método descrito se puede particularizar al caso de un sistema de “*Road Charging*” aplicado a una carretera, calle o *vía de circulación* en general. Igualmente es aplicable en este caso particular al “*Road Charging*” de una carretera en el que el importe a cobrar dependa de la distancia recorrida. En este caso los módulos de detección y cobro del sistema tienen en cuenta que el vehículo no puede ocupar cualquier posición dentro de la *frontera* de la región, sino que ha de encontrarse en la *vía de circulación* que contiene. Cada *tramo* de carretera queda caracterizado por una longitud, y una distancia entre el *borde* de la infraestructura por la que puede circular el vehículo (por ejemplo, borde del arcén) y la *frontera*.

Por otro lado, el método de análisis para este escenario permite un cálculo matemático para los casos más desfavorables identificados como:

- desde el punto de vista de *disponibilidad de cobro*, el peor caso corresponde al vehículo circulando en el borde exterior de la carretera;
- desde el punto de vista de *probabilidad de cobro indebido*, el peor caso corresponde a un vehículo permanente (durante el *periodo de cobro* considerado) localizado en un punto inmediatamente exterior a la *frontera*.

Con estas consideraciones y ambos parámetros (*disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indebido*), el análisis se simplifica enormemente para un escenario de visibilidad de satélites dado y para unas prestaciones del receptor predefinidas, son una función directa de la longitud del tramo y la distancia entre la carretera y la barrera de protección.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se pasa a describir brevemente una serie de dibujos que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con realizaciones de dicha invención que se presentan a modo de ejemplos ilustrativos pero no limitativos de ésta.

La figura 1 ilustra un escenario genérico de “Road Charging” perimetral, identificando la nomenclatura y principales términos manejados en la descripción de la invención siendo un apoyo para el entendimiento de la misma y de los términos y definiciones que se utilizan.

La figura 2 ilustra un diagrama de bloques funcional genérico del sistema de “Road Charging” de prestaciones garantizadas, identificando sus componentes y algoritmos principales.

La figura 3 es similar a la figura 1, pero para el caso de “Road Charging” aplicado a una vía de circulación.

La figura 4 ilustra un diagrama de bloques del sistema de “Road Charging” de prestaciones garantizadas, para el caso de una vía de circulación.

La figura 5 ilustra el diagrama de bloques funcional genérico del Método de Análisis de Prestaciones del Sistema de “Road Charging” de prestaciones garantizadas para un sistema de cobro perimetral, identificando los pasos y algoritmos principales.

La figura 6 muestra una gráfica de *disponibilidad de cobro* de un sistema automático de “Road Charging” de una vía de circulación en función de (m) y de (d/RPL).

La figura 7 muestra un ejemplo de identificación de configuraciones de carretera (distintas longitudes y distancias a la frontera) para las que es posible asegurar las prestaciones de *disponibilidad de cobro* y *posibilidad de cobro indebido* en función del nivel de integridad del OBU.

Descripción detallada de una realización preferida de la invención

Definiciones previas

A lo largo de la presente descripción se utilizan una serie de términos que a continuación se definen con el objeto de clarificar la comprensión de esta invención:

- *Disponibilidad de Cobro*: Probabilidad de que dentro del *periodo de cobro* un vehículo que efectivamente ha usado la infraestructura sea detectado por el sistema y, por tanto, cobrado.

- *Probabilidad de Cobro Indebido*: Probabilidad de que un vehículo portador del *receptor embarcado* u OBU que no haya usado la infraestructura, o en su caso, el *tramo de vía* que se considere, durante el *periodo de cobro* sea indebidamente detectado por el sistema y, por tanto, cobrado erróneamente.

- *Receptor Embarcado u On-Board Unit (OBU)*: Receptor GNSS capaz de generar datos de posición del vehículo portador a partir de la recepción y procesamiento de la señal de un sistema de navegación global por satélite (Global Navigation Satellite System) del tipo del actual GPS o del futuro sistema europeo Galileo.

- *Receptor Embarcado u OBU con Integridad*: Receptor GNSS que además de proporcionar la información de posición proporciona información adicional relativa al error que cabe esperar en dicha posición y que consiste en:

- *Bandera de salud* (“Healthy”/“Unhealthy”): Cuando la *bandera* es “Healthy” el error en la solución de posición en una dirección y sentido cualquiera está acotado superiormente por la cantidad *RPL* con una probabilidad igual a un valor conocido, la integridad de la solución de posición proporcionada por el receptor embarcado I_{RX} .

- *Nivel de Protección Radial RPL*, es decir, la cantidad que acota el error en la posición horizontal según una dirección y sentido con una probabilidad igual a I_{RX} , es decir:

$$P(|\vec{e}_j \cdot \vec{u}| > RPL_j) = 1 - I_{RX}$$

siendo $\vec{u}$ un vector unitario cualquiera.

ES 2 302 317 T3

Un caso particular de implementación consiste en la utilización de una OBU que implemente los algoritmos y métodos de aseguramiento de la integridad que se describen en la solicitud de patente europea ep 05076289.7.

Por el contrario diremos que un Receptor GNSS no es íntegro cuando no se da la *bandera de salud* ni/no el *RPL* o sí se dan, pero la probabilidad de que el error no esté acotado por *RPL* no es conocida.

- *Periodo de Cobro T_c* : Periodo de tiempo mínimo dentro del cual se cobra al usuario el mismo importe independientemente del número de veces que se haya usado (entrada-salido) la infraestructura. En el caso de un peaje perimetral (por ejemplo, pago por acceso al centro urbano), el *periodo de cobro* típico sería un día. Es decir, se cobra un importe fijo al usuario por haber entrado una o más veces en el centro urbano a lo largo del día.

- *Frontera 100*: la curva cerrada en el plano horizontal que define la región cuyo uso se pretende cobrar. Se define de tal forma que cualquier vehículo que haya estado dentro de dicha *frontera* durante el *periodo de cobro* está sujeto a cobro. Por ejemplo, en el caso de un peaje perimetral, la *frontera* está delimitada por los puntos de todas las vías de entrada a la zona de cobro a partir del cual se le avisa al usuario que está sujeto a peaje. En el caso de una vía de circulación sujeta a cobro (carretera, autopista o calle por ejemplo) la *frontera del tramo de la vía* está definida por una curva cerrada que contiene el *tramo de la vía de circulación* en cuestión, y no incluye ningún punto de circulación de otra *vía* ni ningún punto de zona por la que esté autorizada la circulación o la estancia de un vehículo.

- *Bordes de una Vía de Circulación 200*: Curvas definidas por el borde exterior de los arcones de la *vía*.

- *Tramo de una Vía de Circulación*: se llama *tramos de una vía de circulación* a una fracción de la *vía* de la cual no es posible entrar ni salir salvo por los extremos de la misma (es decir sin bifurcaciones ni accesos).

- $\vec{R}_i(t)$: *Trayectoria Real* que ha descrito un cierto vehículo *i* durante el *periodo de cobro T_c* .

- $\{\vec{R}_{mi}(t_0), \vec{R}_{mi}(t_1), \vec{R}_{mi}(t_2), \dots, \vec{R}_{mi}(t_n)\}$ al conjunto de posiciones medidas por el *receptor embarcado* en los distintos instantes de muestreo del mismo $(t_0, t_1, t_2, \dots)$ contenidos en T_c . Siendo n el número de muestras de posición proporcionadas por el *receptor embarcado* del vehículo *i* durante T_c . El *periodo de muestreo* ha de ser igual o superior al tiempo de decorrelación del *error en posición* entre medidas..

- Se denotamos con el superíndice H a aquellas posiciones obtenidas por el *receptor embarcado* que el *receptor* haya decidido marcar *Healthy* $\vec{R}_{mi}^H(t_j)$.

- $\{\vec{R}_i(t_0), \vec{R}_i(t_1), \vec{R}_i(t_2), \dots, \vec{R}_i(t_n)\}$: o de posiciones reales correspondientes a los distintos instantes de muestreo del *receptor* $(t_0, t_1, t_2, \dots)$.

- *Vector Error en Posición Horizontal* o simplemente *error en posición* ($\vec{\epsilon}_{ij}$) o a la medida de posición del *receptor embarcado* en el vehículo *i* obtenida en t_j : la diferencia $\vec{R}_{mi}(t_j) - \vec{R}_i(t_j)$

- Se llama *Disponibilidad de Posición GNSS* (D_{RX}) a la probabilidad de que el *receptor embarcado* obtenga una posición marcada como “*Healthy*” en un punto (x,y) en un instante de muestreo t_j .

- Se llama RPL_{ij} , al *RPL* que el *receptor embarcado* del vehículo *i* proporciona en un instante t_j .

- Si el vehículo entra una o más veces durante T_c , habrá una o más posiciones del conjunto $\{\vec{R}_i(t_0), \vec{R}_i(t_1), \vec{R}_i(t_2), \dots, \vec{R}_i(t_n)\}$ de la *frontera*. Se llama $\{\vec{R}_i(t'_j)\}$ subconjunto de posiciones, siendo $t'_j |_{j=1,2,\dots,m}$ stantes de tiempo de muestro del *receptor* en los que la posición real del vehículo está efectivamente dentro de la *frontera*.

- Se llama *Distancia Real* (z_{rij}) a la *frontera* del vehículo *i* en el instante t_j a la distancia entre el punto ocupado por la posición real del vehículo y la *frontera*.

- Se llama *Distancia Medida* (z_{mij}) a la *frontera* del vehículo *i* en el instante t_j a la distancia entre el punto ocupado por la posición medida por el *receptor embarcado* del vehículo y la *frontera*.

En ambos casos se adopta el convenio de darle a la distancia signo positivo o negativo dependiendo de que el punto esté dentro (+) o fuera de la *frontera*.

- Se llama *Prestaciones GNSS* en un punto del plano horizontal (x,y) en un instante de muestreo determinado (t) a la *disponibilidad de posición GNSS* (D_{RX}) e *integridad* (I_{RX}) de las posiciones obtenidas por el *receptor embarcado* en ese punto e instante de muestreo. Observar por tanto que se tiene en cuenta la señal y las condiciones de recepción de la misma (visibilidad y multipath).

ES 2 302 317 T3

I. Sistema automático de cobro o “Road Charging” perimetral de prestaciones garantizadas

En la figura 1 se muestra un escenario genérico de sistema automático de cobro “Road Charging” perimetral de prestaciones garantizadas. En este caso el criterio de cobro está definido de tal forma que el cobro se produce si el vehículo se ha encontrado una o más veces dentro de una región delimitada por la *frontera* (100) durante el *periodo de cobro*.

El sistema automático de cobro de prestaciones garantizadas responde al diagrama funcional que se ilustra en la figura 2.

El sistema cuenta con un *receptor embarcado u OBU* íntegra 30 que a partir del procesado de la señal GNSS 20 transmitida por un sistema GNSS 10 trata de generar en cada instante de muestreo una medida de posición, así como una *bandera de salud* y un *RPL* asociado a la misma. Los módulos de detección y cobro 70 procesa dichos datos junto con las coordenadas que definen la *frontera* 50 de la región con el objeto de detectar si el vehículo se ha encontrado una o más veces dentro de la misma y decidir en consecuencia cobrar o no al vehículo.

Por tanto, el módulo de detección 70 determina si un vehículo i ha usado o no la infraestructura a partir de los siguientes datos:

- Salida del *receptor embarcado u OBU* íntegra ($\vec{R}_{mi}^H(t_i)$ y RPL_{ij}) durante las n muestras tomadas durante el *periodo de cobro* T_c .

- Coordenadas de la *frontera* de la infraestructura a cobrar.

El módulo de detección aplica dos niveles diferentes de test: por un lado determina si el vehículo i estuvo o no dentro de la *frontera* en cada instante de muestreo (*Test de Detección*); por otro lado decide a partir de la cantidad de veces K que detectó que el vehículo estuvo dentro, si efectivamente usó o no la misma (*Decisión de uso*).

[1] *Decisión de Vehículo i dentro de la frontera en un instante de muestreo determinado (Test de Detección)*

Para decidir si el vehículo estuvo o no dentro de la *frontera* en un instante de muestreo determinado en que se obtuvo una posición “*healthy*”, el módulo de detección comprueba que el círculo de radio *RPL* centrado en la posición “*healthy*” esté dentro de la *frontera*. Es decir, comprueba que la distancia a la *frontera* sea positiva y mayor que *RPL*:

$$\zeta Z_{mij} > RPL_{ij} ?$$

[2] *Decisión de si el vehículo efectivamente usó o no la infraestructura (Decisión de Uso)*

El módulo de detección considera que la condición anterior se debe cumplir al menos en K posiciones “*healthy*” del conjunto de muestras obtenidas durante T_c para decidir que efectivamente el vehículo llegó a usar la infraestructura:

¿Hay K o más posiciones en las que se verifique el Test de Detección?

Mediante la aplicación a las muestras proporcionadas por una *OBU* íntegra del Test de Detección y de la Decisión de Uso anteriores, las prestaciones del sistema de cobro, es decir, *disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indebido* son determinables en función de las *prestaciones GNSS* como se indica a continuación.

A. Disponibilidad de Cobro del sistema automático de “Road Charging” perimetral

La *disponibilidad de cobro* es igual a la probabilidad Pd_i de que el módulo de detección decida cobrar a un vehículo i que efectivamente ha entrado en la región delimitada por la *frontera*. Esta será a su vez igual a la probabilidad de disponer de K o más puntos que cumplan el *Test de Detección*:

$$Pd_i = Pd_i(k=K) + Pd_i(k=K+1) + \dots + Pd_i(k=m)$$

donde K es el número de puntos que precisa el módulo de detección y m es el número de muestras independientes de posición generadas por el *receptor embarcado* mientras el vehículo estuvo efectivamente dentro de la *frontera*.

ES 2 302 317 T3

Y $Pd_i(k=l)$ es la probabilidad de que l puntos superen el *Test de Detección*. $Pd_i(k=l)$ se puede expresar como:

$$\begin{aligned}
 Pd_i(k=l) = & p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_l \cdot (1 - p_{l+1}) \cdot (1 - p_{l+2}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\
 & + p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_l \cdot p_{l+1} \cdot (1 - p_{l+2}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\
 & + p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot p_4 \cdot \dots \cdot p_l \cdot p_{l+1} \cdot p_{l+2} \cdot (1 - p_{l+3}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\
 & + \dots \\
 & + p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot \dots \cdot (1 - p_{m-l}) \cdot p_{m-l+1} \cdot p_{m-l+2} \cdot \dots \cdot p_m \\
 & + \\
 & + (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_{l+1} \cdot (1 - p_{l+2}) \cdot (1 - p_{l+3}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\
 & + (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot (1 - p_3) \cdot p_4 \cdot \dots \cdot p_{l+2} \cdot (1 - p_{l+3}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\
 & + \dots \\
 & + (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot (1 - p_3) \cdot \dots \cdot (1 - p_{m-l}) \cdot p_{m-l+1} \cdot p_{m-l+2} \cdot \dots \cdot p_m \\
 & + \\
 & \dots \\
 & + (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot \dots \cdot (1 - p_{m-l-1}) \cdot p_{m-l} \cdot p_{m-l+1} \cdot p_{m-l+2} \cdot \dots \cdot p_m
 \end{aligned}$$

donde p_j es la probabilidad de que en el instante t'_j (en el que la posición real $\vec{R}_i(t'_j)$ del vehículo i estaba dentro de la frontera) la posición medida por el receptor $\vec{R}_{mi}(t'_j)$ este disponible y que esté marcada como “healthy” por el receptor y que un círculo de radio RPL_{ij} centrado en ella se encuentre contenido dentro de la frontera.

La probabilidad p_j se puede descomponer en dos términos según la expresión:

$$p_j = D_{Rxj} \cdot r_j$$

donde:

* $D_{Rxj} = D_{Rx}(\vec{R}_i(t'_j), t'_j)$ es la probabilidad de que un receptor embarcado situado en la posición $\vec{R}_i$ que ocupa el vehículo en el instante de muestreo t'_j con las condiciones de GNSS en ese instante del día obtenga una posición marcada como “healthy”. Es decir, se trata de la *disponibilidad de posición GNSS* (D_{Rx}) en un punto e instante determinado tal y como fue definida anteriormente.

* $r_j = r_j(z_{rj})$: es la probabilidad de que un círculo de radio RPL_{ij} centrado en $\vec{R}_{mi}^H(t'_j)$ cumpla las condiciones del *Test de Detección*.

Esta probabilidad es una función de la *distancia real* a la frontera (z_{rj}) según la expresión:

$$r_j = P(\vec{\epsilon}_j \cdot \vec{n}_{rj} < z_{rj} - RPL_j) \quad \text{siendo } z_{rj} > 0.$$

La probabilidad r_j admite cierto tratamiento analítico gracias a que cuando la posición es marcada como *healthy* (como es aquí el caso) el *error en posición* se comporta de tal forma que sabemos que está acotado por RPL_j con un nivel de confianza de I_{Rx} . Es decir, si el receptor embarcado es íntegro sabemos que:

$$P(|\vec{\epsilon}_j \cdot \vec{n}_{rj}| > RPL_j) = 1 - I_{Rx}$$

Observar que típicamente $1 - I_{Rx} \ll 1$.

ES 2 302 317 T3

Según esta expresión encontramos que r_j adopta los siguientes valores en función de la distancia a la *frontera*:

- A distancias de la *frontera* que van desde 0 hasta $2RPL$, r_j varía significativamente desde un valor muy pequeño en 0 e igual a $(1 - I_{RX})$, hasta un valor grande próximo a 1 e igual a I_{RX} en $2RPL$:

Para $0 < z_{rj} < 2RPL$:

$$r_j = P(\vec{\varepsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < -RPL_j) = 1 - I_{RX} \text{ (en } z_{rj}=0)$$

$$r_j = P(\vec{\varepsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < RPL) = I_{RX} \text{ (en } z_{rj} = 2RPL)$$

En este caso y puesto que el *error en posición* se mantiene dentro del intervalo definido por RPL , se puede asumir de forma conservadora que la proyección del error según la normal se comporta de tal forma que está acotado siempre por una distribución Gaussiana de desviación estándar igual a RPL/F donde F es el denominado factor de protección asociado a I_{RX} (F está definido según la expresión: $P(x \in N(0,1) > F) = 1 - I_{RX}$)

Según esta nueva aproximación conservadora:

Para $0 < z_{rj} < 2 \cdot RPL_j$:

$$r_j \geq P(\vec{\varepsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < z_{rj} - RPL_j) = P(F \cdot \frac{\vec{\varepsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}}}{RPL_j} < F \cdot (\frac{z_{rj}}{RPL_j} - 1))$$

$$r_j \geq P(x \in N(0,1) < F \cdot (\frac{z_{rj}}{RPL_j} - 1))$$

- A distancias a la *frontera* superiores a $2RPL$, r_j es próximo a 1 (superior a I_{RX}):

Para $2RPL < z_{rj}$

$$r_j = P(\vec{\varepsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < RPL) \geq I_{RX}$$

B. Probabilidad de Cobro Indebido del sistema automático de “Road Charging” perimetral

Si el vehículo i no usa la infraestructura en ningún momento del *periodo de cobro* T_c , según la definición de *probabilidad de cobro indebido* Pmd_i ésta será igual a la probabilidad de que el módulo de detección del sistema detecte que el vehículo i ha entrado K o más veces en la *frontera* durante ese *periodo de cobro* T_c ; es decir, si existen K o más muestras de posición medidas por el *receptor embarcado* durante el *periodo de cobro* T_c en las que el círculo de radio RPL_{ij} centrado en $R_{mi}^H(t_i)$ está dentro de la *frontera*. Pmd_i es igual a:

$$Pmd_i = Pmd_i(k=K) + Pmd_i(k=K+1) + \dots + Pmd_i(k=M)$$

donde:

* M es el total de muestras independientes tomadas del *receptor embarcado* en el vehículo i durante todo el *periodo de cobro*; y,

* $Pmd_i(k=l)$ es la probabilidad de detectar solo l puntos de los que están dentro siendo igual a:

$$\begin{aligned}
 Pmd_i(k=l) = & pm_1 \cdot pm_2 \cdot pm_3 \cdot \dots \cdot pm_l \cdot (1 - pm_{l+1}) \cdot (1 - pm_{l+2}) \cdot \dots \cdot (1 - pm_M) + \\
 & + pm_1 \cdot (1 - pm_2) \cdot pm_3 \cdot \dots \cdot pm_l \cdot pm_{l+1} \cdot (1 - pm_{l+2}) \cdot \dots \cdot (1 - pm_M) + \\
 & + pm_1 \cdot (1 - pm_2) \cdot (1 - pm_3) \cdot pm_4 \cdot \dots \cdot pm_l \cdot pm_{l+1} \cdot pm_{l+2} \cdot (1 - pm_{l+3}) \cdot \dots \cdot (1 - pm_M) + \\
 & + \dots \\
 & + pm_1 \cdot (1 - pm_2) \cdot (1 - pm_3) \cdot \dots \cdot (1 - pm_{m-l}) \cdot pm_{m-l+1} \cdot pm_{m-l+2} \cdot \dots \cdot pm_M \\
 & + \\
 & + (1 - pm_1) \cdot pm_2 \cdot pm_3 \cdot \dots \cdot pm_{l+1} \cdot (1 - pm_{l+2}) \cdot (1 - pm_{l+3}) \cdot \dots \cdot (1 - pm_M) + \\
 & + (1 - pm_1) \cdot pm_2 \cdot (1 - pm_3) \cdot pm_4 \cdot \dots \cdot pm_{l+2} \cdot (1 - pm_{l+3}) \cdot \dots \cdot (1 - pm_M) + \\
 & + \dots \\
 & + (1 - pm_1) \cdot pm_2 \cdot (1 - pm_3) \cdot \dots \cdot (1 - pm_{m-l}) \cdot pm_{m-l+1} \cdot pm_{m-l+2} \cdot \dots \cdot pm_M \\
 & + \\
 & \dots \\
 & + (1 - pm_1) \cdot (1 - pm_2) \cdot (1 - pm_3) \cdot \dots \cdot (1 - pm_{m-l-1}) \cdot pm_{m-l} \cdot pm_{m-l+1} \cdot pm_{m-l+2} \cdot \dots \cdot pm_M
 \end{aligned}$$

donde pm_j es la probabilidad de detección errónea en el instante t'_j que (en el que la posición real $\vec{Rr}_i(t'_j)$ del vehículo i estaba fuera de la frontera), es decir, la probabilidad de que la posición medida por el receptor $\vec{R}_{mi}(t'_j)$ exista, que la marque como “healthy” y que un círculo de radio RPL_{ij} centrado en ella esté dentro de la frontera.

La probabilidad pm_j puede descomponerse en dos términos según la expresión:

$$p_j = D_{Rxj} \cdot r_j$$

donde:

* $D_{Rxj} = D_{Rx}(\vec{Rr}_i(t'_j), (t'_j))$: es la *disponibilidad de posición GNSS* (D_{Rx}) en un punto e instante determinado, tal y como fue definida anteriormente.

A efectos de análisis de *disponibilidad de cobro* se puede hacer la simplificación conservadora de que D_{Rx} es 1.

* $r_j = r(z_{rj})$: es la probabilidad de que un círculo de radio RPL_{ij} centrado en $\vec{R}_{mi}^H(t_j)$ (la posición válida obtenida por el receptor embarcado situado en la posición $\vec{Rr}_i$ que ocupa el vehículo i en el instante t'_j fuera de la frontera) cumpla las condiciones del *Test de Detección*.

Esta probabilidad es una función de la *distancia real* a la (z_{rj}) según la expresión (idéntica a la obtenida anteriormente pero para z negativa, pues se trata de la probabilidad de detección aplicada a puntos exteriores de la región):

$$r_j = P(\vec{\varepsilon}_j \cdot \vec{n}_{rj} < z_{rj} - RPL_{ij}) \quad (\text{con } z_{rj} < 0)$$

Como se vio anteriormente, la probabilidad r_j admite cierto tratamiento analítico gracias a que cuando la posición es marcada como “healthy” (como es aquí el caso) el *error en posición* se comporta de tal forma que:

$$P(|\vec{\varepsilon}_j \cdot \vec{n}_{rj}| > RPL_{ij}) = 1 - I_{RX}$$

Según esta expresión nos encontramos que en general r_j es muy pequeño e inferior a $1 - I_{RX}$, pues para $z_{rj} < 0$:

$$r_j = P(\overline{\varepsilon_j} \cdot \overline{nr_j} < z_{rj} - RPL_j) \leq P(\overline{\varepsilon_j} \cdot \overline{nr_j} < -RPL_j)$$

$$r_j \leq P(\overline{\varepsilon_j} \cdot \overline{nr_j} > RPL_j) = 1 - I_{RX}$$

La *probabilidad de cobro indebido* cuando un vehículo está fuera de la región y por muy lejos de la región que se encuentre, está acotada superiormente si el *receptor* es íntegro y además esa cota superior vale $1 - I_{RX}$. Dicho de otra forma, gracias al uso de un *receptor embarcado* íntegro es posible garantizar prestaciones en la *probabilidad de cobro indebido*.

A efectos de cálculo de la *probabilidad de cobro indebido* se puede hacer la aproximación conservadora de que la disponibilidad de posiciones fuera de la *frontera* es 1 y que r es igual a $1 - I_{RX}$. En este caso la *probabilidad de cobro indebido* en cualquier punto exterior es igual a $1 - I_{RX}$.

Según esta simplificación conservadora la expresión general de la *probabilidad de cobro indebido* puede calcularse como una binomial de la forma:

$$Pmd_i \leq \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{RX})^k \cdot (I_{RX})^{M-k}$$

II. Sistema automático de cobro o "Road Charging" de una Vía de Circulación de prestaciones garantizadas

Este caso se ilustra en la figura 3. En este caso el criterio de cobro está definido de tal forma que el cobro se produce si el vehículo ha utilizado una o más veces la Vía de Circulación en cuestión dentro del *periodo de cobro*.

En un caso más general el criterio de cobro puede depender de la distancia que el vehículo haya recorrido dentro de la Vía de Circulación. Este caso se reduce al anterior fragmentando la *vía de circulación* completa en *tramos* de longitud conocida sin más entradas ni salidas de la misma que las propias de la Vía. Cada *tramo* es tratado de la misma forma que la que se propone a continuación.

El sistema automático de cobro de prestaciones garantizadas responde al diagrama funcional que se ilustra en la figura 4.

En este caso el sistema cuenta con un *receptor embarcado u OBU* íntegra 30 que a partir del procesado de la señal GNSS 20 transmitida por un sistema GNSS 10 trata de generar en cada instante de muestreo una medida de posición, así como una *bandera de salud* y un *RPL* asociado a la misma. Los módulos de detección y cobro 70 procesan dichos datos junto con las coordenadas que definen los *bordes del tramo* de la *vía de circulación* 50' con el objeto de detectar si el vehículo se ha encontrado una o más veces dentro de la misma, y decidir en consecuencia cobrar o no al vehículo.

Por tanto, el módulo de detección 70 determina si un vehículo i ha usado o no dicho *Tramo* de la Vía a partir de los siguientes datos:

- Salida del *receptor embarcado u OBU* íntegra ($R_{mi}^H(t_j)$ y RPL_{ij}), durante las n muestras tomadas durante el *periodo de cobro* T_c .

- Coordenadas del *borde del tramo de la vía de circulación* a cobrar.

El módulo de detección aplica dos niveles diferentes de test: por un lado determina si el vehículo i estuvo o no dentro del *tramo de la vía* en cada instante de muestreo (*Test de Detección*); por otro lado decide a partir de la cantidad de veces K que detectó que el vehículo estuvo dentro, si efectivamente usó o no la misma (*Decisión de Uso*).

[1] Decisión de Vehículo dentro del Tramo de la Vía en un instante de muestreo determinado (*Test de Detección*)

Para decidir si el vehículo estuvo o no dentro del *tramo de la vía* en un instante de muestreo determinado en que se obtuvo una posición "healthy", el módulo de detección comprueba que el círculo de radio *RPL* centrado en la posición "healthy" esté dentro de la *frontera del tramo*. Es decir, comprueba que la distancia a la *frontera del tramo* sea positiva y mayor que *RPL*:

$$Z_{mij} > RPL_{ij}?$$

donde la *frontera del tramo de la vía* está definida por una curva cerrada que contiene el *tramo de la vía de circulación* en cuestión, y no incluye ningún punto de circulación de otra *vía* ni ningún punto de zona por la que esté autorizada la circulación o la estancia de un vehículo.

Como se explica, y forma parte del método de análisis de la presente invención, para un escenario de “Road Charging” determinado, a la hora de definir la *frontera* se puede seleccionar ésta de tal forma que mejore las prestaciones del sistema de “Road Charging” en la dirección deseada. Si se trata de una Vía de circulación que no tiene ninguna otra vía de circulación contigua sujeta a “Road Charging”, seleccionando la *frontera* más amplia compatible con las condiciones establecidas anteriormente. Si hay otras Vías de circulación contiguas que también están sujetas a cobro, la solución óptima ha de analizarse utilizando el método de análisis descrito más adelante.

[2] *Decisión de si el vehículo efectivamente usó o no la Vía de circulación (Decisión de Uso)*

El módulo de detección considera que la condición anterior se debe cumplir al menos en K posiciones “*healthy*” del conjunto de muestras obtenidas durante T_c para decidir que efectivamente el vehículo llegó a usar la vía de circulación:

¿Hay K o más posiciones en las que se verifique el Test de Detección?

Mediante la aplicación a las muestras proporcionadas por una OBU íntegra del Test de Detección y de la Decisión de Uso anteriores, las prestaciones del sistema de cobro, es decir, *disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indebido* son determinables en función de las *prestaciones GNSS* como se indica a continuación.

A. *Disponibilidad de Cobro del sistema automático de “Road charging” de una Vía de Circulación*

A la hora de calcular la *disponibilidad de cobro* de un vehículo i cuya *trayectoria* efectivamente ha recorrido la *vía de circulación* en cuestión, es posible restringir el universo de *trayectorias* posible a un *peor caso conservador* consistente en que el vehículo circula sobre el propio *borde* de la vía más próximo a la *frontera* y que se encuentra a una distancia d_j de la misma.

Si se introduce esta condición en el cálculo de la probabilidad r de superar el *Test de Detección* resulta:

$$r_j = P(\vec{\epsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < z_{rj} - RPL_j) \quad \text{siendo } z_{rj} \geq d_j.$$

Como d_j es en general mayor o igual a cero resulta:

$$r_j \geq P(\vec{\epsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < d_j - RPL_j)$$

Esta expresión puede ser analizada según el valor de d_j y RPL :

- En carreteras donde $d_j = 0$, r_j será prácticamente nulo. De hecho será igual a $(1 - I_{RX})$:

$$r_j \geq P(\vec{\epsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < -RPL_j) = 1 - I_{RX}$$

- En carreteras donde $d_j = 2 \cdot RPL_j$ existirá Núcleo y r valdrá:

$$r_j \geq P(\vec{\epsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < RPL_j) = I_{RX}$$

- En carreteras donde $0 < d_j < 2 \cdot RPL_j$ r estará acotado entre $(1 - I_{RX})$ e I_{RX} . En este caso y puesto que el *error en posición* se mantienen dentro del intervalo definido por RPL , podemos asumir de forma conservadora que la proyección del error según la normal se comporta de tal forma que está acotado siempre por una distribución Gaussiana de desviación estándar igual a RPL/F donde F es el denominado factor de protección asociado a I_{RX} (F está definido según la expresión: $P(x \in N(0,1) > F) = -I_{RX}$) Según esta nueva aproximación conservadora:

Para $0 < d_j < 2 \cdot RPL_j$:

$$r_j \geq P(\vec{\epsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < d_j - RPL_j) = P(F \cdot \frac{\vec{\epsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}}}{RPL_j} < F \cdot (\frac{d_j}{RPL_j} - 1))$$

$$r_j \geq P(x \in N(0,1) < F \cdot (\frac{d_j}{RPL_j} - 1))$$

Para una carretera de distancia del *borde* a la *frontera* constante ($d_j = \text{cte} = d$), r_j también es constante a lo largo de la *trayectoria* del vehículo. Si además se considera que la *disponibilidad* D_{RX} GNSS a lo largo de la misma es también constante, la expresión de *disponibilidad de cobro* para un vehículo i toma la forma:

$$Pd_i \geq \left[\sum_{k=K}^m \binom{m}{k} (D_{RX} \cdot r)^k \cdot (1 - D_{RX} \cdot r)^{m-k} \right]$$

con

$$r = 1 - I_{RX}; (d = 0)$$

$$r = P(N(0,1) < F \cdot (\frac{d}{RPL} - 1)); (0 < d < 2RPL)$$

$$r = I_{RX}; (d \geq 2RPL)$$

Esta expresión de P_d permite determinar la *disponibilidad de cobro* para un vehículo cualquiera en función de K , m , d/RPL , D_{RX} e I_{RX} (observar que F depende tan solo de I_{RX}).

B. Probabilidad de Cobro Indevido del sistema automático de “Road charging” de una Vía de Circulación

Si el vehículo i no usa el *tramo* de la *vía de circulación* en ningún momento del *periodo de cobro* T_c , según la definición de *probabilidad de cobro indevido* Pmd_i ésta será igual a la probabilidad de que el módulo de detección del sistema detecte que el vehículo i ha entrado K o más veces en la *frontera* durante ese *periodo de cobro* T_c , es decir, si existen K o más muestras de posición medidas por el *receptor embarcado* durante el *periodo de cobro* T_c en las que el círculo de radio RPL_{ij} centrado en $R_{mi}^H(t_j)$ está dentro de la *frontera*. Según esto la expresión general anterior sigue siendo válida:

$$Pmd_i \leq \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{RX})^k \cdot (I_{RX})^{M-k}$$

Observar que con la definición de *frontera* para una *vía* que ha sido utilizada, la probabilidad de que un vehículo supere los dos tests del módulo de detección sobre una *vía de circulación* y la más próxima a ésta es también igual o inferior a la expresión anterior.

II. Método de análisis de prestaciones de un sistema de cobro o “Road Charging”

La invención también se refiere a un método de análisis y diseño que permite relacionar las prestaciones del sistema de “Road Charging” con los datos del escenario de que se trate y las prestaciones del *receptor*.

Es decir, se pueden realizar diferentes tipos de análisis asociados al sistema de “Road Charging”:

- Diseñar el sistema de “Road Charging”: ajustando o seleccionando adecuadamente los distintos parámetros que lo definen (la geometría de la infraestructura objeto de cobro), de tal forma que se garanticen unas prestaciones de *disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indevido* definidas por el proveedor de la infraestructura (un ayuntamiento, una empresa concesionaria de autopistas, el Estado, etc.).

- Analizar las Prestaciones de un sistema de “Road Charging”, dada una serie de parámetros del sistema:

- previendo cuáles serán las prestaciones de cobro del sistema antes de que este entre en funcionamiento y, por tanto, ver si se cumplirán o no los requisitos establecidos sin necesidad de realizar costosos ensayos para acumular estadísticas.
- demostrando cuáles son las prestaciones de cobro de un sistema ya operativo, sin necesidad de recurrir a estadísticas sobre operación real durante largos periodos de tiempo y amplios universos de muestreo, ante posibles reclamaciones o repudio de pago.

La herramienta de análisis y diseño de la invención está basada en los siguientes componentes y algoritmos:

- Un interfaz hombre-máquina que permite introducir los distintos parámetros que afectan a las prestaciones del sistema, tales como número de vehículos, *probabilidad de cobro indevido* aceptable, periodo de observación, etc.

ES 2 302 317 T3

- Simulador de los distintos sistemas GNSS, en particular del movimiento de los satélites.
- Una herramienta tipo GIS que permite configurar las *fronteras* para cada región, vía o *tramo de vía*.
- Una descripción 3D de las carreteras, ciudades y su entorno.
- Una herramienta de análisis de visibilidad de satélites para distintas posiciones del usuario que, dada su posición, la geometría del entorno y la posición simulada de los satélites, permita identificar los satélites visibles.
- Una caracterización de las prestaciones del *receptor* (tamaños de los *RPLs*, I_{RX} y *bandera de salud*) del usuario en función del número de satélites en vista y otras características de éste con un modelo basado en los algoritmos identificados en la solicitud de patente europea ep 05076289.
- Un modelo de tráfico que proporcione *trayectorias* esperadas y su frecuencia de suceso.
- Un proceso de cálculo como se indica en los siguientes puntos IV y V, según se trate del análisis y diseño de un sistema de cobro o “Road charging” perimetral o por uso de una vía de circulación, respectivamente.

IV. Método de Análisis de Prestaciones de un sistema de cobro o “Road Charging” perimetral

Para un sistema automático de cobro perimetral como el descrito anteriormente es posible determinar y, por tanto, analizar, las prestaciones del mismo a partir de las condiciones de contorno y las *Prestaciones GNSS*, mediante el método que se propone a continuación.

La figura 5 muestra el diagrama de bloques de los principales pasos del método objeto.

De acuerdo a la formulación obtenida, a la hora de calcular la *disponibilidad de cobro* para un escenario dado, es decir, para una *frontera* y un valor de K determinado, el método que se presenta es como sigue:

S1. Obtener el mapa de *prestaciones GNSS* (D_{RX} y *RPL*): De acuerdo a las prestaciones del *receptor* GNSS y las condiciones de visibilidad GNSS se determina para cada punto interior a la región y para cada instante posible de muestreo la probabilidad de disponer de posición marcada como “*healthy*” por el *receptor* ($D_{RX} = D_{RX}(R_i(t_j^l), t_j^l)$), así como los valores esperados *RPL* asociados a sus medidas de posición para un cierto valor dado de integridad I_{RX} .

S2. Obtener el mapa de *disponibilidad de cobro asociado* a cada punto e instante de muestreo (p_j), definido como la probabilidad de que un vehículo al pasar por dicho punto en ese instante genere una muestra de posición “*healthy*” que cumpla el *Test de Detección*. Para cada punto interior de la región e instante de muestreo se calcula la probabilidad de detección sobre el mismo p_j utilizando para ello la el mapa anterior junto con la expresión de r sobre cada punto interior descrita anteriormente:

$$p_j = D_{RXj} \cdot r_j$$

donde:

- $D_{RXj} = D_{RX}(\vec{R}_i(t_j^l), t_j^l)$: Es la *disponibilidad de posición GNSS* (D_{RX}) en un punto e instante determinado tal y como fue obtenida en el paso anterior; y
- $r_j = r_j(z_{rj})$: es la probabilidad de que un círculo de radio RPL_j centrado en (z_{rj}) cumpla las condiciones del *Test de Detección*. Esta probabilidad es una función de la *distancia real* a la *frontera* (z_{rj}) según la expresión:

$$r_j = P(\vec{\epsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < z_{rj} - RPL_j) \quad \text{siendo } z_{rj} > 0,$$

donde r_j se calcula para cada punto a distancia de la *frontera* z_{rj} : mediante:

- Para $0 \geq z_{rj} \geq 2RPL$:

$$r_j = P(\vec{\epsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < -RPL_j) = 1 - I_{RX} \quad (\text{en } z_{rj}=0)$$

$$r_j = P(\vec{\epsilon_j} \cdot \vec{n_{rj}} < RPL) = I_{RX} \quad (\text{en } z_{rj} = 2RPL)$$

y en los puntos interiores:

$$r_j \geq P(x \in N(0,1) < F \cdot (\frac{z_{rj}}{RPL_j} - 1))$$

con F definido de tal forma que $P(x \in N(0,1) > F) = 1 - I_{Rx}$

- A distancias a la *frontera* superiores a $2RPL$, r_j es próximo a 1 (superior a I_{Rx}):

Para $2RPL < z_{rj}$

$$r_j = P(\overleftarrow{\varepsilon_j} \cdot \overrightarrow{nr_j} < RPL) \geq I_{Rx}$$

S3. Crear el *Universo de Trayectorias*: Crear el universo de *trayectorias* posibles (Tr_i). de acuerdo a los datos de tráfico real disponibles en la zona. Cada *trayectoria* está definida por la secuencia de vectores de posición horizontal que el vehículo describe en la misma y por el dato de frecuencia de suceso de la misma (fr_i).

S4. Determinar la *disponibilidad de cobro* para cada *trayectoria* (Pd_i): para cada *trayectoria* Tr_i . se determina la *disponibilidad de cobro* (Pd_i) mediante la expresión:

$$\begin{aligned} Pd_i(k=l) = & p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_l \cdot (1 - p_{l+1}) \cdot (1 - p_{l+2}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\ & + p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_l \cdot p_{l+1} \cdot (1 - p_{l+2}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\ & + p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot p_4 \cdot \dots \cdot p_l \cdot p_{l+1} \cdot p_{l+2} \cdot (1 - p_{l+2}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\ & + \dots \\ & + p_1 \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot \dots \cdot (1 - p_{m-l}) \cdot p_{m-l+1} \cdot p_{m-l+2} \cdot \dots \cdot p_m \\ & + \\ & + (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_{l+1} \cdot (1 - p_{l+2}) \cdot (1 - p_{l+3}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\ & + (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot (1 - p_3) \cdot p_4 \cdot \dots \cdot p_{l+2} \cdot (1 - p_{l+3}) \cdot \dots \cdot (1 - p_m) + \\ & + \dots \\ & + (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot (1 - p_3) \cdot \dots \cdot (1 - p_{m-l}) \cdot p_{m-l+1} \cdot p_{m-l+2} \cdot \dots \cdot p_m \\ & + \\ & \dots \\ & + (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot (1 - p_3) \cdot \dots \cdot (1 - p_{m-l-1}) \cdot p_{m-l} \cdot p_{m-l+1} \cdot p_{m-l+2} \cdot \dots \cdot p_m \end{aligned}$$

donde P_i se toma en cada punto j de la *trayectoria* i del mapa obtenido en el paso 2.

5. Determinar la *disponibilidad de cobro promedio*: A partir de Pd_i y la frecuencia de suceso de cada *trayectoria* fr_i obtenemos la *disponibilidad de cobro promedio* como:

$$\text{Disponibilidad de Cobro (Promedio)} = \sum Pd_i \cdot fr_i$$

6. Determinar la *probabilidad de cobro indebido* como:

$$Pmd_i = \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{Rx})^k \cdot (I_{Rx})^{M-k}$$

donde M es el total de muestras generables por el receptor embarcado durante todo el periodo de cobro.

7. Comprobar si las prestaciones del sistema de “road charging” son compatibles con los requisitos existentes. Si no es así, comprobar si es posible cumplir dichos requisitos modificando K .

5 Observar que aumentar el valor de K permite para un mismo valor de I_{RX} reducir la *probabilidad de cobro indebido* a costa de disminuir la *disponibilidad de cobro*. De forma contraria, disminuir K mejora la *disponibilidad de cobro* a costa de empeorar la *probabilidad de cobro indebido*.

V. Método de Análisis de Prestaciones de un sistema de cobro o “Road Charging” de una Vía de Circulación

10 Para un sistema automático de cobro de una vía de circulación como el descrito anteriormente es posible determinar, y por tanto, analizar las prestaciones del mismo a partir de las condiciones de contorno y las *prestaciones GNSS* mediante el método que se propone a continuación.

15 En este caso además del análisis anterior (dadas unas *prestaciones GNSS* y unas condiciones de contorno determinar las prestaciones del sistema automático de “Road Charging”), es posible comprobar directamente si es viable cumplir simultáneamente los requisitos de *disponibilidad de cobro* y de *probabilidad de cobro indebido* mediante el método que se explica a continuación:

20 1. A partir del número de vehículos que se mantiene típicamente fuera de la vía de circulación (Np) y del requisito que deseamos sobre la probabilidad de cobrar indebidamente a MD o más vehículos a lo largo de Tc (PMD) se determina la cota superior admisible de *probabilidad de cobro indebido* para un vehículo que no use la *vía de circulación* mediante:

$$25 \quad PMD = \sum_{md=MD}^{NP} \binom{NP}{md} Pmd^{md} \cdot (1 - Pmd)^{NP-md}$$

30 2. Con el valor de Pmd obtenido y dadas unas prestaciones en Integridad I_{RX} del *receptor embarcado*, se determina el número de puntos K del *módulo de detección* del sistema que garantiza la Pmd requerida mediante la expresión:

$$35 \quad Pmdi = \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{RX})^k \cdot (I_{RX})^{M-k}$$

40 3. Con el valor de K resultante, y dado el valor de I_{RX} y de RPL para el *receptor embarcado* y el escenario de recepción de señal dado, se construye la familia de curvas del tipo de la gráfica de la Figura 7 mediante la expresión de Pdi :

$$45 \quad Pdi \geq \left[\sum_{k=K}^m \binom{m}{k} (D_{RX} \cdot r)^k \cdot (1 - D_{RX} \cdot r)^{m-k} \right]$$

con

$$r = 1 - I_{RX}; (d = 0)$$

$$50 \quad r = P(N(0,1) < F \cdot (\frac{d}{RPL} - 1)); (0 < d < 2RPL)$$

$$r = I_{RX}; (d \geq 2RPL)$$

55 Así, en la figura 7 se muestran posibles configuraciones de carretera para las que es posible asegurar las prestaciones de *disponibilidad de cobro* y *posibilidad de cobro indebido* en función del nivel de integridad del OBU. En esta gráfica se muestran posibles soluciones para distintos valores de $1 - I_{RX}$, siendo las soluciones posibles las que están por encima de cada curva.

60 A partir de dicha familia de curvas se obtiene el número de puntos mientras el vehículo se encuentra dentro de la *frontera* (m) que se precisan para garantizar la *disponibilidad de cobro* requerida.

65 4. Dada una longitud del *Tramo* de la Vía de Circulación en cuestión (L), una velocidad del vehículo (V) y un tiempo de decorrelación entre medidas (τ_c), se comprueba que el número de muestras de posición disponible $L/(V \cdot \tau_c)$ dentro de la *frontera* es igual o superior al número de muestras necesarias m que resultó del paso anterior. Observar que m es el número de puntos en los que el vehículo está dentro de la *frontera* y el *receptor embarcado* intenta proporcionar una muestra de posición y, por tanto, es igual al tiempo total de permanencia del vehículo dentro de la *frontera* dividido por

ES 2 302 317 T3

el tiempo de decorrelación entre medidas). Si no es así, esto significa que no es posible lograr cumplir simultáneamente los requisitos de *probabilidad de cobro indebido* y de *disponibilidad de cobro* para el escenario dado para ningún valor de K .

5. En el caso de que no sea posible cumplir ambos requisitos, si resulta posible alejar la *frontera* de la *vía* cumpliendo las condiciones de la misma, resulta factible aumentar la *disponibilidad de cobro* manteniendo la *probabilidad de cobro indebido*. Efectivamente, escogiendo una *frontera* válida (es decir, que cumpla los condicionantes anteriormente descritos) más alejada se aumenta la distancia d del *borde* de la *vía* a la *frontera*, lo que aumenta el valor de r y por tanto de P_{di} .

A modo de ejemplo, en la figura 6 se muestra una gráfica de *disponibilidad de cobro* de un sistema automático de “Road Charging” de una vía de circulación en función de (m) y de (d/RPL) . En concreto, la *disponibilidad de cobro* está calculada para los siguientes valores: $K=5$, $I_{RX}=2,8E-07$ y $D_{RX}=50\%$.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema automático de cobro a un vehículo (i) por uso durante un *periodo de cobro* T_c de una infraestructura delimitada por una *frontera* (100) basado en localización GNSS de prestaciones garantizadas, que comprende:

- un *receptor embarcado u OBU* con integridad (30) que además de proporcionar información de posición proporciona información adicional relativa al error que cabe esperar en dicha posición consistente en:

- una *bandera de salud* (“*Healthy*”/“*Unhealthy*”), cuando la *bandera* es “*Healthy*” el error en la solución de posición en una dirección y sentido cualquiera está acotado superiormente por la cantidad *RPL* con una probabilidad igual a un valor conocido (I_{RX}), y.

- un *RPL o Radial Protection Level*, es decir, la cantidad que acota el error en la posición horizontal según una dirección y sentido con una probabilidad igual a un valor conocido I_{RX} , es decir:

$$P \left(\left| \vec{\varepsilon} \cdot \vec{u} \right| > RPL \right) = 1 - I_{RX}$$

siendo $\vec{u}$ un vector unitario cualquiera,

- un módulo de detección (70) que determina que el vehículo está dentro de la *frontera* en un instante cuando todos los puntos delimitados de una región comprendida por un círculo de radio *RPL* centrado en dicha posición están dentro de la *frontera*, y

- un módulo de cobro (70) que emplea el resultado del módulo de detección para determinar que el vehículo ha usado la infraestructura durante dicho *periodo de cobro* T_c .

2. Sistema automático de cobro según la reivindicación 1, **caracterizado** porque el módulo de cobro determina que el vehículo ha usado la infraestructura durante dicho *periodo de cobro* T_c cuando hay un número K de posiciones predefinido para las cuales el módulo de detección ha determinado que el vehículo está dentro de la *frontera*, es decir, para las K posiciones se cumple que una región comprendida por un círculo de radio *RPL* centrado en ellas está dentro de la *frontera* durante T_c ,

y donde el valor de K se escoge para asegurar que la *probabilidad de cobro indebido*, es decir, la probabilidad de que el vehículo portador del *receptor embarcado* que no haya estado dentro de la *frontera* durante el *periodo de cobro* sea cargado, esté acotada, estando la relación entre K y dicha *probabilidad de cobro indebido* dada por la expresión:

$$Pmd_i \leq \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{RX})^k \cdot (I_{RX})^{M-k}$$

donde M es el total de muestras independientes tomadas del *receptor embarcado* en el vehículo i durante todo el *periodo de cobro* T_c .

3. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque es un sistema automático de cobro perimetral, cuya *frontera* (100) está delimitada por los puntos de todas las vías de entrada a la zona de cobro a partir del cual se le avisa a un usuario del vehículo que está sujeto a cobro.

4. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1-2, **caracterizado** porque es un sistema automático de cobro por uso de una vía de circulación, cuya *frontera* está definida de forma que contiene dicha vía de circulación y no contiene ninguna otra vía de circulación o lugar permitido de paso o de estancia de vehículos.

5. Un sistema según la reivindicación 4, **caracterizado** porque es un sistema automático de cobro por uso de una distancia de la vía de circulación, estando dicha distancia calculada en base a la suma de longitudes de *tramos de vía* en los que se puede dividir ésta de forma que cada *tramo* no tiene más entrada o salida que sus propios extremos.

6. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1-2 ó 4-5, **caracterizado** porque para cobrar debe determinarse el sentido de la vía ha circulado el vehículo, mediante comprobación de que se dispone de al menos dos posiciones cuya secuencia en el tiempo define el sentido de circulación, y que cumplen que las regiones definidas por un círculo de radio *RPL* centrado en las mismas tienen intersección nula.

7. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque el cobro depende del número de veces que el vehículo entra en la infraestructura.

ES 2 302 317 T3

8. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el cobro se calcula en la OBU con datos sobre la *frontera* enviados desde un centro de control.

9. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1-7, en el que el cobro se calcula, para distintos vehículos equipados con OBUs, en un centro de control con datos sobre posiciones, *RPLs* y *banderas de salud* enviados desde cada OBU.

10. Un sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque el OBU incluye un módulo que identifica, para un tiempo igual al *periodo de muestreo*, el instante óptimo del cual se obtiene la muestra -posición, velocidad, *RPL* y *bandera de salud*-, siendo el óptimo aquel instante cuya muestra tiene mínimo *RPL* dentro del conjunto de medidas con *banderas de salud* declaradas como “*healthy*”, y donde el valor del *periodo de muestreo* se selecciona como un valor:

- mayor que el periodo de muestreo del *receptor*,

- mayor que el tiempo de correlación de las medidas de tal forma que se garantice que los errores de las muestras no están correlados, y

- menor que un cierto valor que garantice un nivel global de *disponibilidad de cobro*.

11. Un método de análisis y diseño de un sistema de cobro perimetral según una cualquiera de las reivindicaciones 1-3 ó de las reivindicaciones 7-10 cuando dependen de la 3, que comprende los siguientes pasos:

- obtener un mapa de *prestaciones GNSS* (D_{RX} , I_{RX} , *RPL*), determinando para cada punto interior a la *frontera* y para cada instante de muestreo la probabilidad de disponer de posición marcada como “*healthy*” por el *receptor* ($D_{RX} = D_{RX}(R_i(t_j^l), t_j^l)$), así como los valores esperados de *RPL* asociados a sus medidas de posición para un cierto valor dado de integridad I_{RX} , de acuerdo a las prestaciones del *receptor embarcado* GNSS y a las condiciones de visibilidad GNSS;

- obtener un mapa de *disponibilidad de cobro* asociado a cada punto interior e instante de muestreo (p_j), calculándose para cada punto interior e instante de muestreo la probabilidad de que un vehículo situado en dicho punto en ese instante genere una muestra de posición “*healthy*” y que sea detectado por el módulo de detección del sistema, para lo que utiliza el mapa de *prestaciones GNSS* junto con la siguiente expresión de r sobre cada punto interior:

$$p_j = D_{Rxj} \cdot r_j$$

donde:

* $D_{Rxj} = D_{RX}(R_i(t_j^l), t_j^l)$ es la *disponibilidad de posición GNSS* (D_{RX}) en un punto e instante determinado tal y como fue obtenida en el paso anterior; y

* $r_j = r_j(z_{ij})$ es la probabilidad de que un círculo de radio RPL_{ij} centrado en $R_{mi}^H(t_j)$ esté dentro de la *frontera*, siendo ésta una función únicamente de la distancia del punto a la *frontera* (z_{ij}) y del valor esperado de *RPL* en el punto;

- crear un universo de *trayectorias* posibles (Tr_i) de acuerdo a los datos de tráfico real disponibles en la infraestructura, estando cada *trayectoria* definida por una secuencia de vectores de posición horizontal que el vehículo describe en la misma y por el dato de frecuencia de suceso de la misma (fr_i);

- determinar la *disponibilidad de cobro* para cada *trayectoria* (Pd_i), determinando para cada *trayectoria* Tr_i la *disponibilidad de cobro* mediante una formulación que es función únicamente de la cantidad de puntos K que precisa el módulo de cobro del sistema, de la *disponibilidad de cobro* en cada punto de la *trayectoria*, del tiempo de decorrelación del error de las posiciones obtenidas por el *receptor* GNSS, de la *disponibilidad GNSS*, de la longitud de la *trayectoria* que discurre dentro del perímetro y de la velocidad del vehículo a lo largo de la *trayectoria*;

- determinar la *disponibilidad de cobro* promedio a partir de Pd_i y la frecuencia de suceso de cada *trayectoria* fr_i como:

$$\text{Disponibilidad de Cobro (Promedio)} = \sum Pd_i \cdot fr_i$$

- determinar la *probabilidad de cobro indebido* como:

$$Pmd_i = \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{RX})^k \cdot (I_{RX})^{M-k}$$

donde M es el total de muestras generables por el *receptor embarcado* durante todo el *periodo de cobro* T_c ; y

- comprobar si las prestaciones del sistema de cobro son compatibles con los requisitos de prestaciones del sistema existentes, y de no ser así comprobar si es posible cumplir dichos requisitos modificando K .

12. Un método de análisis y diseño de un sistema de cobro para vías de circulación según una cualquiera de las reivindicaciones 1-2 ó 4-6 ó de las reivindicaciones 7-10 cuando dependen de una cualquiera de las reivindicaciones 4-6, y que permite, para un *tramo* dado de *vía de circulación* **caracterizado** por su geometría, en particular longitud L y distancia d entre el *borde* de la *vía* y la *frontera*, y la geometría de su entorno, analizar las prestaciones del sistema en términos de *disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indebido* como función del número de posiciones K requeridas por el módulo de cobro, donde el cálculo de la *disponibilidad de cobro* se realiza usando una aproximación conservadora basada en las siguientes hipótesis:

- el vehículo está siempre dentro de la *vía* por la que circulan los vehículos y al *borde* exterior de ésta;
- la distancia de ésta a la *frontera* es “ d ” característico de la infraestructura y que consideramos constante en el *tramo*;
- los errores de posición para probabilidades del orden de magnitud de la *disponibilidad* se pueden acotar de forma conservadora por una distribución Gaussiana de media cero y con una desviación típica calculada como RPL/F siendo F el factor asociada a la probabilidad I_{Rx} de la distribución Gaussiana,

siendo el proceso de cálculo el siguiente:

- a partir del número de vehículos que se mantiene fuera de la *vía* de circulación Np y de un requisito deseado para la *probabilidad de cobro indebido* a MD o más vehículos a lo largo del *periodo de cobro* Tc (PMD) se determina la cota superior admisible de *probabilidad de cobro indebido* para un vehículo que no use la *vía de circulación* Pmd resolviendo por iteración la expresión siguiente:

$$PMD = \sum_{md=MD}^{NP} \binom{NP}{md} Pmd^{md} \cdot (1 - Pmd)^{NP-md}$$

- con el valor de Pmd obtenido y dadas unas prestaciones del *receptor embarcado* en Integridad (I_{Rx}) se determina el número de puntos K del *módulo de detección* del sistema que garantiza la Pmd requerida mediante la expresión:

$$Pmd_i = \sum_{k=K}^M \binom{M}{k} (1 - I_{Rx})^k \cdot (I_{Rx})^{M-k}$$

- con el valor de K resultante, y dado el valor de I_{Rx} y de RPL para el *receptor embarcado*, y un escenario de recepción de señal dado, se construye la familia de curvas del tipo de la gráfica de la Figura 6 mediante la expresión de Pdi :

$$Pdi \geq \left[\sum_{k=K}^m \binom{m}{k} (D_{Rx} \cdot r)^k \cdot (1 - D_{Rx} \cdot r)^{m-k} \right]$$

con

$$r = 1 - I_{Rx}; (d = 0)$$

$$r = P(N(0,1) < F \cdot (\frac{d}{RPL} - 1)); (0 < d < 2RPL)$$

$$r = I_{Rx}; (d \geq 2RPL)$$

- a partir de dicha familia de curvas se obtiene el número de puntos (m) precisados para garantizar la *disponibilidad de cobro* requerida; y
- dada una longitud L del *tramo* de la *vía de circulación*, una velocidad V del vehículo y un tiempo de decorrelación entre medidas τ_c , se comprueba que el número de muestras de posición disponible $L/(V \cdot \tau_c)$ dentro de la *frontera* es igual o superior al número de muestras necesarias m que resultó del paso anterior; y si no es así, esto significa que no es posible lograr cumplir simultáneamente los requisitos de *probabilidad de cobro indebido* y de *disponibilidad de cobro* para el escenario dado para ningún valor de K .

ES 2 302 317 T3

13. Un método de análisis y diseño para *vías de circulación* según la reivindicación 12, que permite aplicando el mismo método identificar los *tramos de vía* que satisfacen unos requisitos especificados de *disponibilidad de cobro* y *probabilidad de cobro indebido*.

14. Un método de análisis y diseño de un sistema de cobro para *vías de circulación* según la reivindicación 12, en el que además el valor de *RPL* se modeliza como una función conocida de I_{RX} según las características del *receptor*, y que permite, para un *tramo dado de vía de circulación caracterizado* por su geometría, en particular longitud *L* y distancia *d* entre el *borde* de la *vía* y la *frontera*, y la geometría de su entorno, y dados unos requisitos de *disponibilidad de cobro* y de *probabilidad de cobro indebido*, determinar el I_{RX} del *receptor* que cumple dichos requisitos.

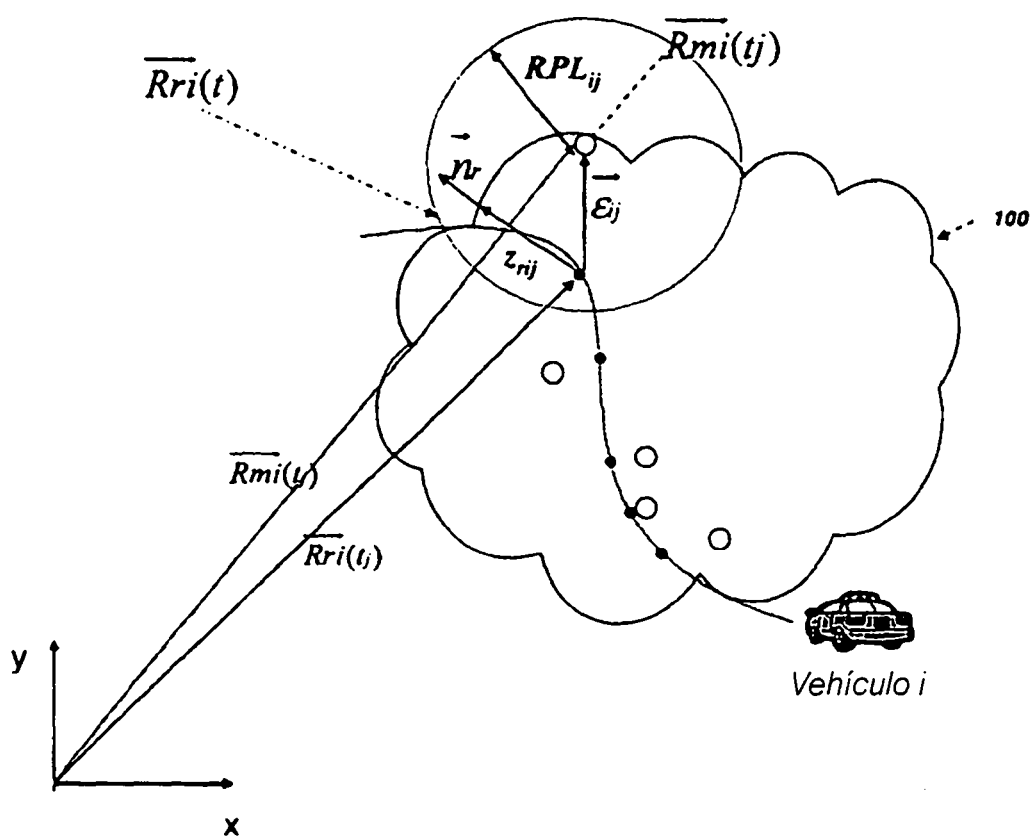


FIG. 1

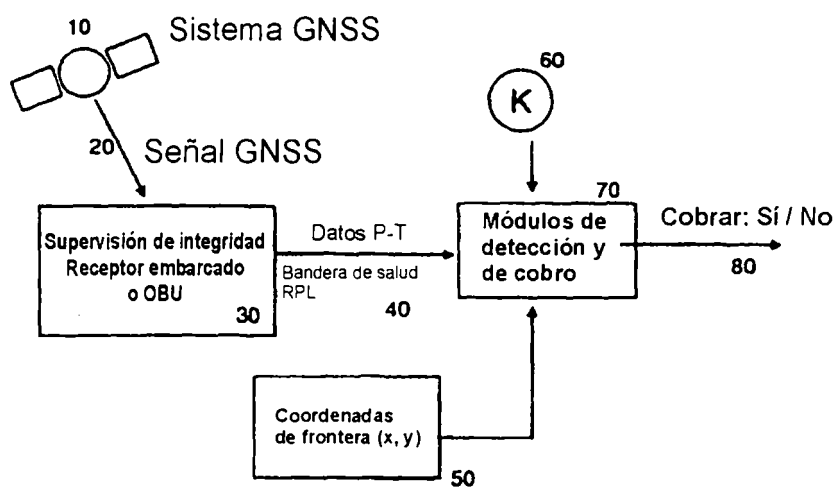


FIG. 2

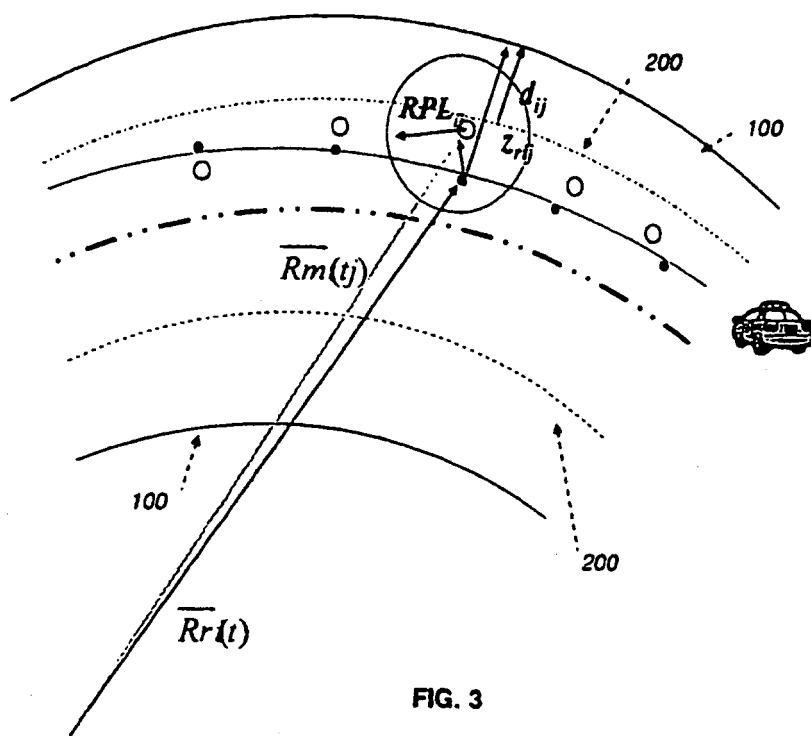


FIG. 3

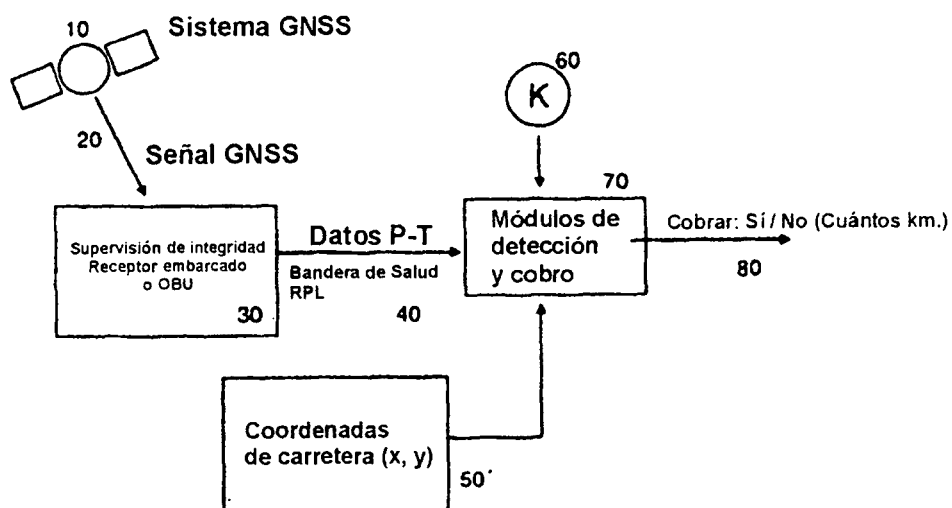


FIG. 4

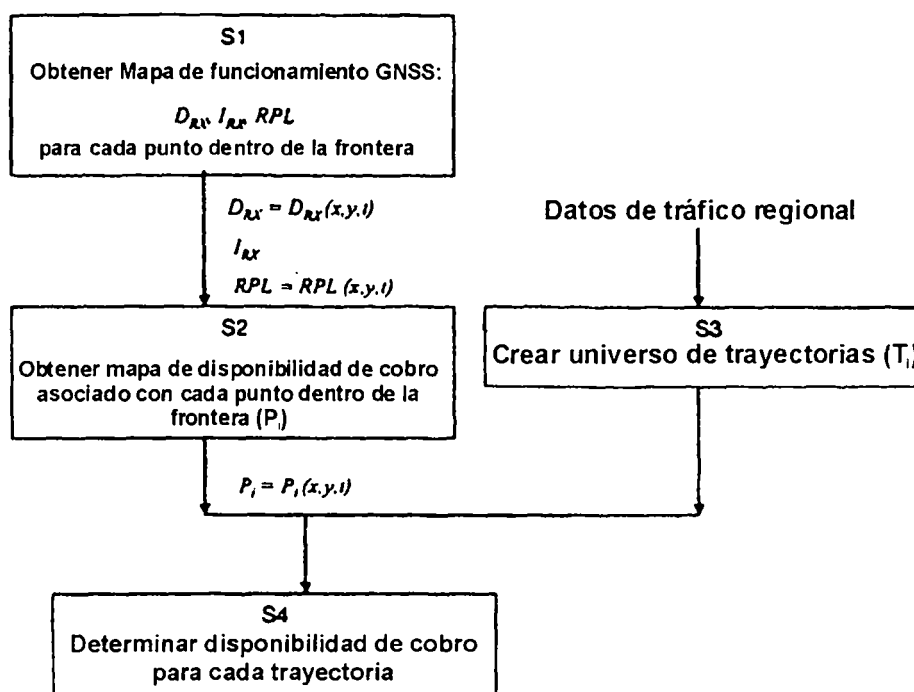


FIG. 5

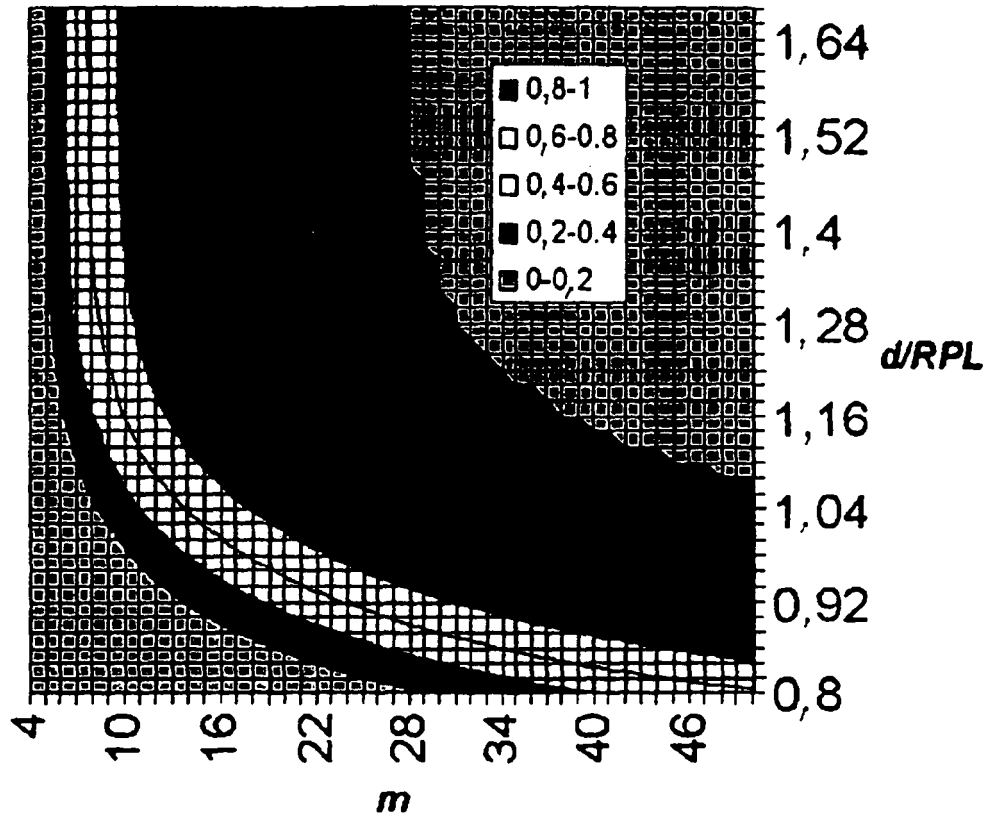


FIG. 6

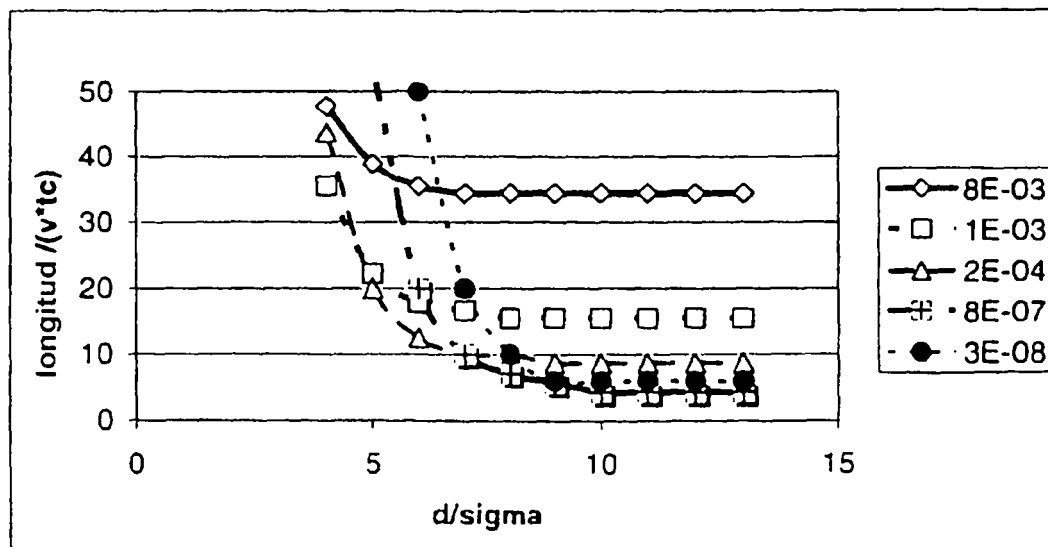


FIG. 7