



APLICACIÓN DE LA ELECTRÓNICA AVANZADA EN TRACTORES Y MÁQUINAS AGRÍCOLAS

Parte 5.- Los sistemas de posicionamiento

PROF. FABRIZIO MAZZETTO

Instituto de Ingeniería Agraria
Universidad de Milán

Clasificación de los sistemas de posicionamiento

En la mayor parte de las aplicaciones previstas por un sistema de Agricultura de Precisión resulta indispensable poder localizar los datos en un sistema de coordenadas de referencia. Esto es imprescindible cuando se necesita situar sobre las parcelas los equipos mecánicos que realizan monitorización de procesos, o bien para la automatización de su trabajo.

Para situar cada vehículo se puede utilizar:

- Instrumentación autónoma situada sobre el vehículo.
- Instrumentación independiente del vehículo, que va equipado con equipos de recep-

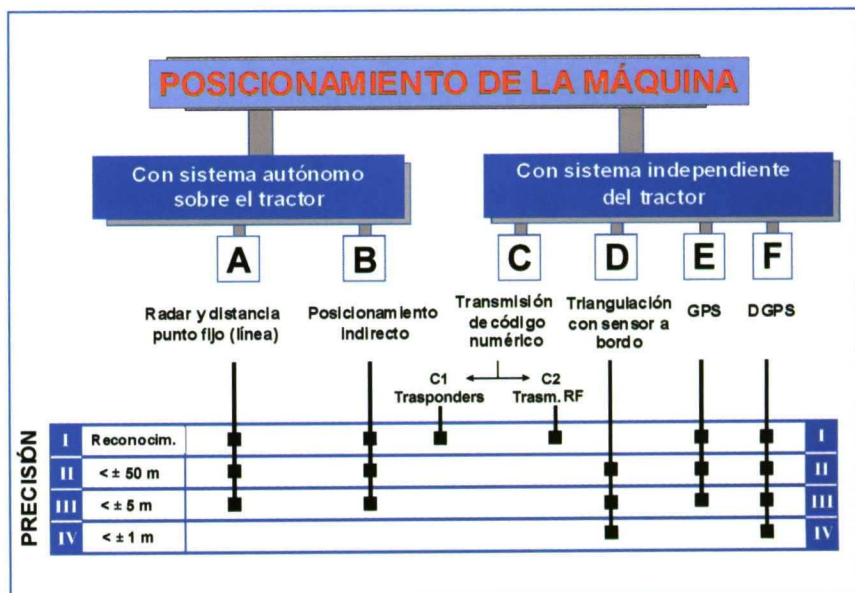
ción/transmisión que le permiten dialogar con el sistema de posicionamiento externo.

En la Figura 1 se presenta un esquema de los sistemas de posicionamiento que se pueden utilizar con las máquinas de campo. Los sistemas A y B necesitan situar sensores a bordo de las máquinas. El A lo han utilizado algu-

nas empresas alemanas de pequeña dimensión, y resulta un sistema poco flexible, ya que necesita colocar líneas de tráfico en posición conocida (podrían ser interesantes para algunos cultivos en línea), determinándose la distancia a un punto fijo mediante la utilización de un radar.

Para el sistema B, de posicionamiento indirecto (*dead rec-*

FIGURA 1.- CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS



koning), no se ha difundido en aplicaciones agrícolas, ya que es complicado y costoso, necesitando diferentes sensores, como radares, detectores de ángulo y giroscopios, que le permiten reconstruir todo el recorrido a partir de un punto inicial. La flexibilidad de utilización es escasa, ya que incluso el reconocimiento de punto inicial no se realiza de manera automática.

Entre los sistemas de posicionamiento independiente del medio, la triangulación con sensores de tierra, D, ofrece elevada precisión pero escasa flexibilidad y costes elevados. Se utilizan detectores de posición, mediante ultrasonidos o con láser, y ésta se calcula en función de los tiempos de envío y respuesta de la señal.

Una solución aprovechable con costes aceptables es la tipo C (*gate detecting*). Es un sistema de posicionamiento muy simplificado que se limita a registrar el paso de entidades específicas (máquinas, personas, animales etc.) por puntos de tránsito predefinidos. En la práctica, se emplean sistemas de identificación, con los que van equipadas las entidades de tránsito, como pueden ser un transmisor de radio frecuencia con código o con una unidad de registro unida a una antena receptora.

La segunda solución es la que ha cobrado mayor éxito en campo agrícola: los tractores se comportan como sistemas de reconocimiento que registran los códigos engendrados por los transmisores establecidos en posiciones fijas cerca de los puntos de tránsito (entrada de edificios, establos, parcelas; específicos lugares de trabajo, como picado-carga o abastecimiento, estaciones de bombeo, etc.).

Sin embargo, se tienen serios problemas operativos de manejo cuando administran muchos puntos de tránsito a pequeña distancia entre sí. Por este motivo, sólo se recomienda su empleo en aquellas situaciones

en que los sistemas de posicionamiento por satélite no pueden funcionar correctamente, como los lugares cerrados o muy tapados por árboles o edificios.

Sistemas de posicionamiento por satélite: el GPS

El posicionamiento mediante sistemas del satélite es la solución que actualmente garantiza la mejor flexibilidad de empleo a costes aceptables, tanto que, frecuente y erróneamente, es habitual que se tienda a hacer coincidir el concepto de posicionamiento mediante satélite con el de agricultura de precisión.



**EL
POSICIONAMIENTO
MEDIANTE SISTEMAS
DE SATÉLITE ES LA
SOLUCIÓN QUE
ACTUALMENTE
GARANTIZA LA MEJOR
FLEXIBILIDAD DE
EMPLEO A COSTES
ACEPTABLES**



Tales soluciones representan sistemas de posicionamiento global, conocidos por el acrónimo GPS (*Global Positioning System*). Los sistemas son 'globales', ya que su servicio está garantizado:

- En cualquier punto de la superficie terrestre.
- De modo continuado en el tiempo.
- Independientemente de las condiciones atmosféricas locales.

Dos son los sistemas de satélite que se utilizan en la actualidad:

- NAVSTAR americano (*NAVigation System Time And Ranging*), que es el más utilizado y que tiene en fin también acuñado el término GPS.
- GLONASS ruso (*GLobal Orbiting NAVigation Satellite System*).

Dentro de poco estará disponible también el sistema europeo Galileo, que, a diferencia de los dos precedentes, nace para aplicaciones en el sector civil.

Un sistema GPS, para solucionar un cualquier problema de posicionamiento, necesita los siguientes elementos:

- Una antena receptora, con capacidad para captar las informaciones transmitidas por cada satélite en una situación visible de su órbita.
- Un receptor, unido a dicha antena, con capacidad para determinar, utilizando procedimientos matemático-estadísticas, a partir de las señales captadas, las coordenadas de posicionamiento. Como el sistema necesita alimentación eléctrica, resulta preferible situarlo a bordo de los tractores.

El sistema americano consta de 24 satélites, a unos 22 000 km de la superficie terrestre, sobre 6 diferentes planos orbitales, y cada uno de los cuales recorre 2 órbitas completas en algo más de 24 horas. Las órbitas han sido definidas de modo que garantizan la visibilidad de al menos 4 satélites en cada instante, para un receptor situado en cualquier lugar de la Tierra. Cada satélite, identificado por su propio código, está equipado con osciladores atómicos capaces de medir el tiempo con una precisión del orden de 10^{-9} s. La precisión de estos 'relojes' es fundamental para solucionar los problemas de posicionamiento y para la navegación.

Cada satélite transmite de manera continua, sobre muchas

bandas de frecuencia, y los mensajes continentes informaciones digitales fundamentales como:

- Su identificación.
- Su posición actual sobre la órbita.
- El instante de tiempo en el que ha sido generado el mensaje.

EN LAS APLICACIONES AGRÍCOLAS DE LOS SISTEMAS PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN SE NECESITA EL POSICIONAMIENTO DE MEDIOS EN MOVIMIENTO

Con esta información el receptor puede calcular su distancia al satélite y, consecuentemente, por triangulación, utilizando todas las señales elaboradas por los satélites presentes sobre el horizonte, determinar su posición dentro de un sistema absoluto de coordenadas de referencia.

El conocimiento de la distancia satélite-receptor es fundamental para fijar la posición. Si se conoce la distancia al receptor de un solo satélite este podría estar situado en un punto de la esfera imaginaria cuyo centro coincide con la posición del satélite. Con dos distancias conocidas, la incertidumbre de la posición del receptor se reduciría a la circunferencia resultante de la intersección de dos esferas, y así sucesivamente.

Para conseguir el posicionamiento 'exacto' del punto R, ocupado por el receptor en un espacio tridimensional, con coordenadas R [x, y, z], se necesitan al menos cuatro distancias satélite-

receptor, el que significa que el receptor tiene que poder 'ver' al menos cuatro satélites.

El sistema de coordenadas cartesianas de referencia, conocido como WGS84, es geocéntrico, teniendo su origen coincidente con el centro de la Tierra. A éste se asocia un elipsoide (GRS80), que permite convertir las coordenadas cartesianas (R [x, y, z]) en coordenadas geográficas, latitud y longitud, referidas a tal elipsoide.

Prestaciones de los receptores: resolución y precisión

En los receptores más simples y menos caros, la distancia receptor-satélite se calcula utilizando como referencia el tiempo transcurrido por los mensajes entre receptor y satélite. Cada receptor está dotado con un reloj capaz de valorar el intervalo de tiempo entre el instante de recepción y el instante de principio transmisión de la señal desde el satélite.

Este cálculo está sometido a varios errores de medida: primero, la menor precisión del reloj del receptor con respecto al atómico del satélite; a éste se suman otros errores en las medidas, como las interferencias de la atmósfera durante la transmisión de las señales y la recepción de señales indeseadas de interferencia (*error de multipath*).

El intervalo de tiempo medido (*range*) es un pseudo-intervalo (T) ya que está afectado por imprecisiones. De aquí el término técnico de *pseudo-range* para indicar tales tipos de medidas. La relativa pseudo-distancia entre receptor y satélite viene calculada como: $D = c \times T$, donde c es la velocidad de la luz.

Todo esto se produce sobre una banda de trans-

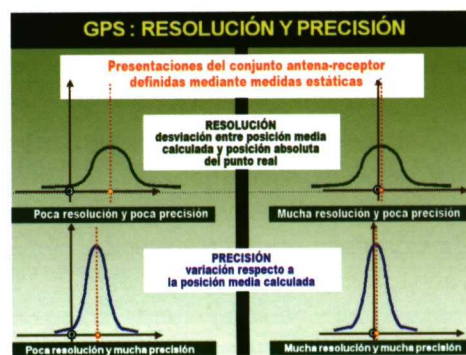
misión del satélite de 1023 MHz, indicada por la sigla C/A (*Coarse Acquisition Code*) o código de adquisición bruta. Los receptores más complejos y caros pueden comunicarse además con otras frecuencias. Así se distingue entre receptores para frecuencia individual L1 (de 1575 MHz) y para doble frecuencia L1 y L2 (de 1227 MHz). Las longitudes de onda de las transmisiones sobre L1 y L2 son, respectivamente, de aproximadamente 19 y 24 cm.

Así, la resolución del posicionamiento resulta afectada por errores más pequeños, ya que las distancias receptor-satélite se computan no sólo con base a los tiempos de vuelo del mensaje, siempre con base en C/A, sino también contando el número de oscilaciones, con longitudes de onda de 19 ó 24 cm, contenidas en la distancia receptor-satélite (medidas de fase).

Las prestaciones de un receptor GPS se valoran a través de medidas estáticas, es decir con receptor inmóvil en posición con coordenadas conocidas, realizadas durante un intervalo de tiempo de 2 a 6 horas. Los datos obtenidos se someten a elaboración de estadísticas para calcular la calidad del posicionamiento, utilizando dos parámetros (Figura 2), que se miden en metros:

- Resolución: desviación entre la posición media calculada y la posición real absoluta del punto buscado.

FIG. 2.- DEFINICIÓN DE LA RESOLUCIÓN Y DE LA PRECISIÓN DE UN RECEPTOR GPS



- Precisión: variabilidad (normalmente en términos de desviación estándar RMS) de la distribución de los puntos determinados con respecto de su posición media calculada.

En las aplicaciones agrícolas de los sistemas para Agricultura de Precisión se necesita el posicionamiento de medios en movimiento, por lo que resulta útil determinar estos parámetros en condiciones dinámicas.

Esto es posible utilizando un equipo de medida capaz de permitir la ejecución simultánea de pruebas estáticas y dinámicas en las que los receptores GPS sean sometidos a las mismas condiciones ambientales (error ionosférico, *multipath*, geometría de los satélites, etc.)

Uno de estos equipos, denominado RotoGPS (Figura 3), ha sido diseñado y construido en el Instituto de Ingeniería Agraria de Milán, y permite realizar ciclos de prueba sobre dos receptores del mismo tipo, uno en condiciones estáticas, el otro en condiciones dinámicas, utilizando intervalos temporales variables entre 1 y 3 horas.

Un ejemplo con los resultados obtenidos se presenta en la Figura 4, utilizando un receptor sobre el que se puede activar, o no, una corrección diferencial del satélite (según el protocolo Waas-Egnos) para mejorar las condiciones de resolución y precisión. Esta última expresa como CEP95, o bien como radio de la circunferencia que encierra el 95% de los puntos de posicionamiento registrados.

En las pruebas dinámicas se generan variadas circunferencias, que se corresponden con las modificaciones de la precisión que se producen cada vez que el receptor debe de cambiar de constelación de satélites. Cuanto más reducido es el número de circunferencias visibles, mucho más elevado es el grado de precisión del receptor (inde-

pendientemente de su resolución), y más estable (también en condiciones de medidas dinámicas) al cambio de los satélites.

La resolución y la precisión condicionan el coste de los receptores. En muchas aplicaciones agrícolas, especialmente en aquellas en las que sólo se necesita la monitorización, no son necesarios elevados niveles de resolución y precisión. También en algunas aplicaciones de control operativo, como es el caso de la conducción asistida, resulta más importante la precisión que la resolución. Este último sólo es indispensable en aplicaciones avanzadas de automatización, como el guiado o el trasplante automático. En la Figura 5 se presentan las necesidades de precisión y resolución para diferentes operaciones agrícolas.

La corrección diferencial: el DGPS

Aunque con mayor resolución, los receptores de frecuencia individual o doble resultan afectados por errores sensibles. La única solución para poderlos reducir drásticamente es comparar los errores del receptor en cuestión, denominado móvil (o *rover*), con los de otro receptor análogo situado en una posición fija de coordenadas conocidas, denominado base (o *master*). Este procedimiento, denominado 'corrección diferencial' (DGPS), es actualmente la mejor solución para garantizar precisiones centimétricas sobre vehículos en movimiento (Figura 5), y puede utilizarse:

- Con posterioridad: cuando las comparaciones y las correcciones son aportadas un tiempo después de realizadas las determinaciones; esto solo puede hacerse en actividades de monitorización.
- En tiempo real: cuando las correcciones se realizan simultáneamente a la determinación, lo que se necesita para la auto-

FIG. 3.- EQUIPO ROTOGPS PARA EVALUAR SIMULTÁNEAMENTE RECEPTORES GPS, CON MEDIDAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS



FIG. 4.- EJEMPLOS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN PRUEBAS REALIZADAS CON ROTOGPS

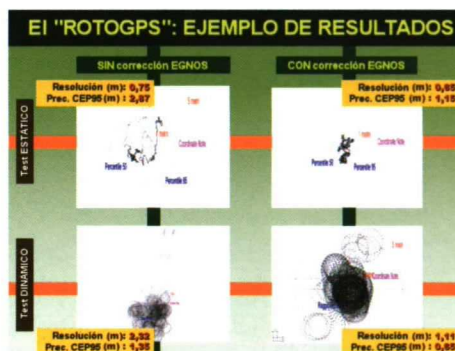
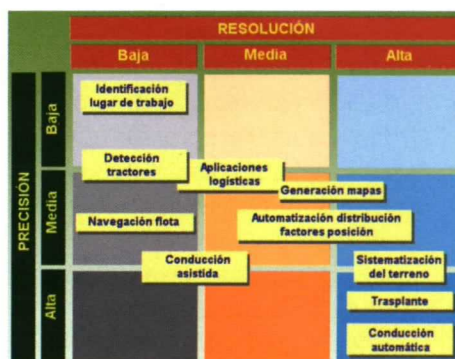


FIG. 5.- EXIGENCIAS DE RESOLUCIÓN Y PRECISIÓN NECESARIAS EN DIFERENTES APLICACIONES AGRÍCOLAS



matización del control operativo de los procesos de campo. En tal caso, el sistema DGPS tiene también que asegurar la transmisión de los datos en tiempo real entre la base y el móvil.

La comunicación entre la base y el móvil puede hacerse mediante protocolos estandarizados, RTCM o RTK. La solución

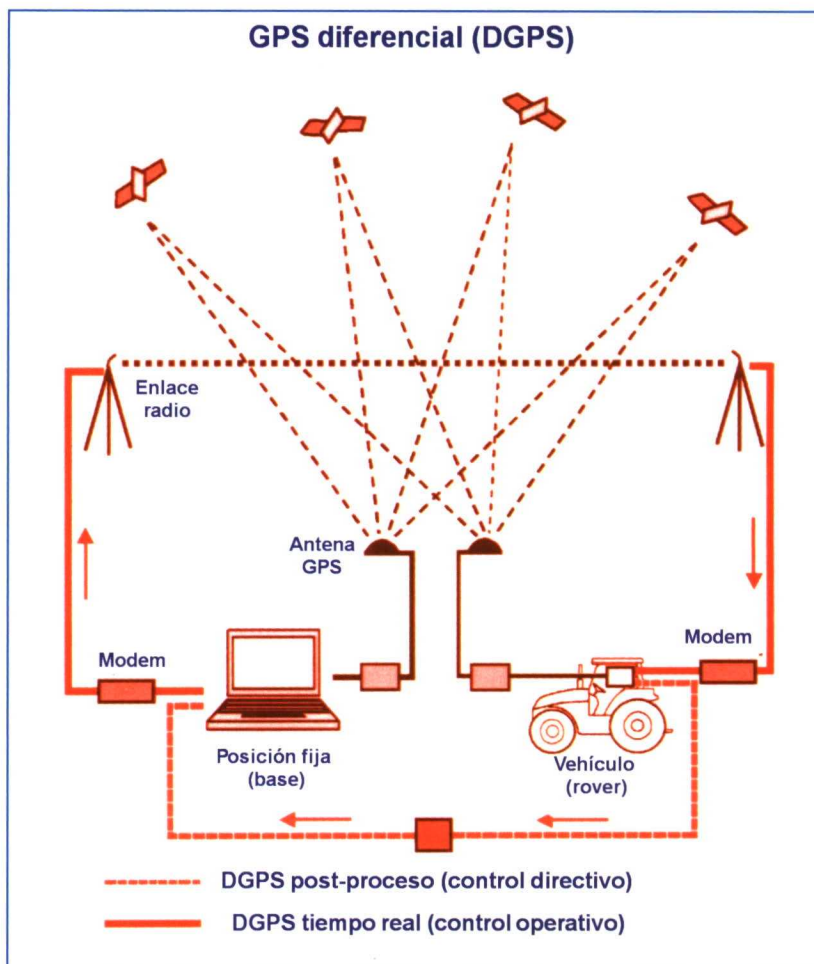
LOS SISTEMAS RTK ESTÁN CONDICIONADOS POR LA NECESIDAD DE ADQUIRIR UN SEGÚN RECEPTOR PARA INSTALARLO EN LA BASE SITUADA EN UNA ZONA PRÓXIMA A LA DE TRABAJO

que ofrece mejores prestaciones, para vehículos en movimiento equipados con receptores en doble frecuencia, es el estándar RTK (*Real Time Kinematic*), gracias al que se consiguen precisiones centimétricas, aunque con mayores costes.

Estos sistemas están condicionados por la necesidad de adquirir un según receptor para instalarlo en la base situada en una zona próxima a la de trabajo del móvil, lo que encarece el sistema, pero resultan necesarios en aplicaciones como el guiado automático o en trabajos de trasplante de precisión. El coste de estos sistemas puede resultar de 10 a 20 veces mayor que el de un buen receptor de frecuencia simple sin ningún tipo de corrección y con una resolución variable de 2 a 10 m.

En muchos países de la UE no están disponibles redes loca-

FIG. 6.- POSIBLES FORMAS DE EMPLEO DEL GPS DIFERENCIAL (DGPS) EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN



les, públicas o privadas, que permitan la transmisión de las señales de corrección diferencial en tiempo real, como las que ofrece el sistema de la Guardia Costera de USA, con transmisión en HF o VHF, o la red DGPS privado de Alemania, que ofrece (mediante pago) la transmisión de las señales de corrección en frecuencia modulada (FM) utilizando el protocolo internacional RDS (*Radio Data System*), ampliamente difundido para la transmisión de

los programas radiofónicos públicos y privados.

Otras soluciones de cierto interés son las de recurrir a recibir en tiempo real (sobre protocolos RTCM) las señales de corrección transmitidas vía satélite por servicios públicos (EGNOS) o privados (Racal, Omnistar, John Deere). Con el primero de estos sistemas el servicio es gratuito, y solo se necesita la adquisición de receptores adecuados para ellos, mientras que con los otros hay que pagar un canon anual o trimestral. Esta solución utiliza satélites geostacionarios, autónomos con respecto de la red GPS real, cuya misión es la de transmitir las informaciones de corrección elaboradas por estaciones 'base' en diferentes posiciones de la Tierra.

Los resultados que se consiguen son satisfactorios, ya que ofrecen resoluciones métricas (1-2 m) o submétricas (0.5 m), utilizando receptores de simple o de doble frecuencia (Tabla 1). ■

TABLA 1.- RESOLUCIONES VERIFICABLES EN DIFERENTES CONFIGURACIONES DE RECEPTORES GPS, Y COSTES RELATIVOS (AÑO 2007)

Frecuencia	Configuración	Resolución media (cm)	Coste (€)
SENCILLA	L1	500	250
	L1 + EGNOS	100	1 000
	L1 + OMNISTAR	50	2 500
	(L1 + RTK) x 2	10	12 000
DOBLE	L1 + L2	200	5 000
	L1 + L2 + EGNOS	50	6 000
	L1 + L2 + OMNISTAR HP	10	8 000
	(L1 + L2 + RTK) x 2	1	20 000