

Navigazione Indoor e Pseudolite: a che punto siamo?

Angela ERRICO, Umberto ROBUSTELLI (*), Raffaele SANTAMARIA (*)

(*)Dipartimento di Scienze Applicate, Facoltà di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
Tel. 081 5475116
email: Raffaele.santamaria@uniparthenope.it; umberto.robustelli@uniparthenope.it; angella.errico@hotmail.com

Riassunto

In questo lavoro è esaminato l'uso di trasmettitori a terra o *pseudo-satellite*, detti anche *pseudolite*. Sono stati sviluppati nuovi concetti di posizionamento con l'uso di pseudolite in ambienti indoor, al fine di ottenere accuratezza della posizione al livello del centimetro. Questo lavoro presenta un overview del sistema GPS (*Global Positioning System*), per le similitudini con i sistemi oggetto dello studio, e tratta le maggior fonti di errore per la navigazione indoor, quali *multipath* e problema *near/far*, proponendo di operare sulle proprietà del segnale pseudolite, segnale like-GPS, al fine di ridurre drasticamente gli effetti dei suddetti errori. Infine vengono mostrate le tecniche DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e FH (*Frequency Hopping*), attraverso cui si realizza la riduzione delle interferenze che affliggono il segnale utile.

Abstract

In this paper the use of ground-based transmitters or *pseudo-satellites*, also called *pseudolites*, is examined. New concepts of indoor positioning with the use of pseudolite have been developed, in order to obtain centimeter level position accuracy. This paper presents an overview of GPS (*Global Positioning System*), because of similes with pseudolites, and discusses the most important errors, such as *multipath* and *near/far*. To tackle these problems, the paper performs on pseudolite signal, considered like-GPS signal, by DSSS and FH techniques, in order to reduce the effects of the errors.

GPS e Pseudolite

Gli attuali sistemi satellitari globali hanno, da sempre, giocato un importante ruolo in applicazioni di navigazione, geodesia, in cui il posizionamento è la maggior componente. È ormai ben noto che per tali sistemi l'accuratezza, la disponibilità, e la affidabilità dei risultati del posizionamento dipendono strettamente da numero e distribuzione geometrica dei satelliti che si stanno tracciando; infatti è necessaria una visuale di almeno quattro satelliti per il posizionamento di codice e cinque per quello di fase. Tuttavia, in alcuni ambienti di osservazione, come canyon urbani o miniere, la degradazione della visibilità dei satelliti rende impossibile le operazioni di posizionamento. In peggiori situazioni, come costruzioni inside e underground, i segnali satellitari sono completamente persi o bloccati. Tali limitazioni sono risolte con l'uso di segnali addizionali trasmessi da dispositivi a terra noti come *pseudo-satellite* o *pseudolite*.

Il concetto di pseudolite fu proposto negli anni '70, ancor prima del lancio dei satelliti GPS, come test per i primi equipment di utenti GPS. Successivamente furono sviluppati nuovi concetti di pseudolite per molte applicazioni, sino ai sistemi di posizionamento con soli pseudolite, consentendo la realizzazione dei servizi di localizzazione indoor. Tuttavia si ricordi che una chiave importante per la navigazione indoor è stata l'uso di pseudolite come *Augmentation GPS System*, dimostrato dal sistema *Synchrolite*, in cui lo pseudolite riflette il segnale del satellite verso l'utente da un punto noto sulla terra.

Posizionamento e Geometria per la Navigazione Indoor con Pseudolite: Sistema Synchrolite e Sistemi Asincrono e Sincrono

Un ricevitore può simultaneamente misurare la pseudorange di un segnale diretto del satellite e la pseudorange dello stesso segnale riflesso da un synchrolite ad un punto noto sulla terra. Sottraendo queste due misure si ottiene una misura differenziale di pseudorange che contiene solo gli errori non spazialmente correlati (multipath, rumore del ricevitore).

Siano r_i la posizione del satellite i , r_j la posizione del synchrolite j , r_u la posizione del ricevitore utente, il range geometrico dal satellite i attraverso il synchrolite j all'utente sarà dato da:

$$r_{iju} = |r_j - r_i| + |r_u - r_j| \quad [1]$$

Il range geometrico dal satellite i diretto all'utente può essere scritta come

$$r_{iu} = |r_j - r_i| + 1_i \cdot (r_u - r_j) \quad [2]$$

Il secondo termine nell'equazione è un termine in eccesso di range che dipende dalla posizione relativa del satellite e dell'utente come visto dal synchrolite.

L'algoritmo di navigazione del synchrolite nel ricevitore sottrae la pseudorange diretta dalla pseudorange riflessa per ottenere la pseudorange differenziale:

$$d\rho_{ij} = (1_j - 1_i) \cdot (r_u - r_j) + c \cdot t_j + d\varepsilon_{ij} \quad [3]$$

$d\rho_{ij}$ è la misura differenziale di pseudorange per il satellite i attraverso il synchrolite j ; 1_i è il vettore unitario dal satellite i all'utente; 1_j è il vettore unitario dal synchrolite j all'utente; c è la velocità della luce; t_j è il tempo di viaggio del segnale attraverso il synchrolite j ; $d\varepsilon_{ij}$ è la somma degli errori associati con queste misure differenziali.

Per sviluppare l'algoritmo di navigazione, si consideri il caso di tre synchrolite ciascuno che riflette il segnale da un singolo satellite. Il ritardo di tempo t_j attraverso ogni synchrolite deve essere noto in anticipo.

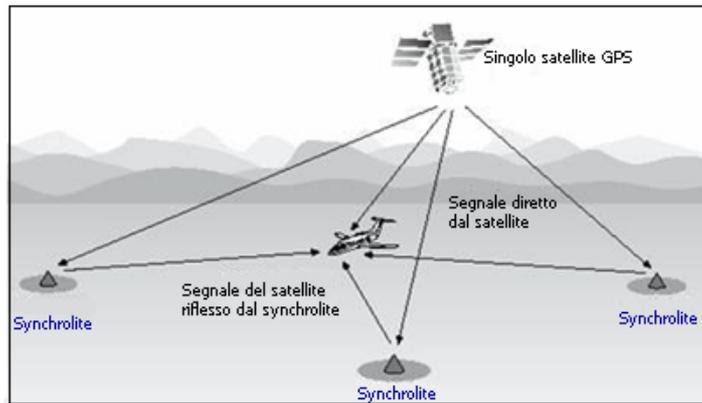


Fig. 1 Posizionamento Differenziale GPS con tre synchrolite nella migliore geometria

Si riordini l'equazione precedente per collocare i termini incogniti a destra e i termini noti a sinistra:

$$d\rho_{ij}^c = d\rho_{ij} - c \cdot t_j + (1_j - 1_i) \cdot r_u + d\varepsilon_i \quad [4]$$

dove $d\rho_{ij}^c$ è la pseudorange differenziale corretta dal synchrolite j all'utente, basata sui segnali dai satelliti i .

Si ottiene una stima \hat{r}_u della posizione utente iniziale. Usando le posizioni r_j e i ritardi di tempo t_j noti del synchrolite, si stimano le quantità $\hat{1}_j$, $\hat{1}_i$, e $d\hat{\rho}_{ij}^c$. La differenza $\Delta d\rho_{ij}^c$ tra le pseudorange stimata e misurata può essere scritta come

$$\Delta d\rho_{ij}^c = d\hat{\rho}_{ij}^c - d\rho_{ij}^c = \left[(\hat{1}_j - \hat{1}_i)^T \right] [\Delta r_u] + \Delta d\varepsilon_i \quad [5]$$

Tre o più di queste equazioni di range possono essere assemblate per formare l'equazione matriciale, risolvendo con processo di iterazione.

Se i ritardi t_j sono incogniti, t_j rimane a destra come una delle incognite:

$$d\rho_{ij}^c = d\rho_{ij} + (1_j - 1_i) \cdot r_j = (1_j - 1_i) \cdot r_u + d\varepsilon_i + c \cdot t_j \quad [6]$$

Si ottiene una stima di posizione iniziale \hat{r}_u e le stime dei ritardi \hat{t}_j . Usando queste stime e le posizioni dei syncrolite note r_j , la differenza $\Delta d\rho_{ij}^c$ tra le pseudorange stimata e misurata sarà:

$$\Delta d\rho_{ij}^c = d\hat{\rho}_{ij}^c - d\rho_{ij}^c = \begin{bmatrix} (\hat{1}_j - 1_i)^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta r_u \\ c \cdot \Delta t_j \end{bmatrix} + \Delta d\varepsilon_i \quad [7]$$

Questa equazione, costruendo l'equazione di matrice, si risolve iterativamente come prima.

Un sistema GPS aumentato con l'utilizzo di pseudolite, come il syncrolite, migliora le prestazioni del sistema tradizionale, in quanto i risultati del posizionamento forniscono accuratezze al livello del centimetro in entrambe le componenti orizzontale e verticale.

Tuttavia, poiché lo pseudolite utilizza un orologio a basso costo, un sistema di navigazione indoor che usi solo pseudolite è afflitto da grandi bias, che devono essere rimossi per poter calcolare la posizione dell'utente. Sono descritti, a tal fine, il sistema Asincrono e Sincrono.

- Sistema di Navigazione Asincrono:

si compone di *pseudolite*, *stazione di riferimento*, e *utente*:

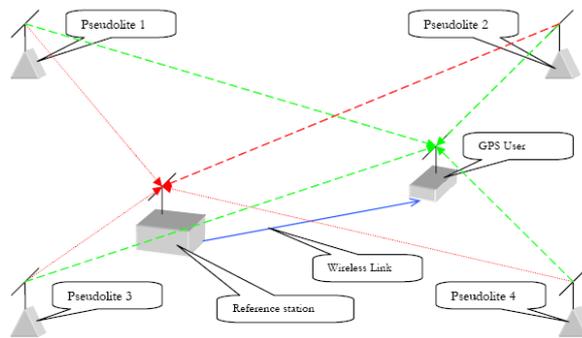


Fig. 2 Sistema pseudolite asincrono

Lo pseudolite usa un orologio indipendente per generare la portante L1 GPS e i codici PRN, per cui il sistema non è sincronizzato. La stazione di riferimento è in grado di inviare e ricevere. Se le posizioni della stazione di riferimento e dello pseudolite sono esattamente noti, si possono calcolare gli errori dell'orologio pseudolite usando i data misurati alla stazione di riferimento. La stazione di riferimento trasmette queste informazioni all'utente via wireless data link. L'utente compensa tali data con l'uso delle correzioni di clock dello pseudolite trasmessi dalla reference station.

- Sistema di Navigazione Sincrono:

si classifica in due tipi. I sistemi si compongono di *pseudolite*, *stazione di riferimento*, e *utente*:

ogni pseudolite ha bisogno di un preciso orologio controllato, che fornisce un clock di riferimento per la generazione del segnale pseudolite. Il sistema di Tipo I (in figura rappresentato da linee rosse) necessita di una reference station, che genera il comando di sincronizzazione del clock per tutti gli pseudolite asserviti. Nel caso del sistema di Tipo II, lo pseudolite asservito contiene il suo proprio modulo di sincronizzazione del clock.

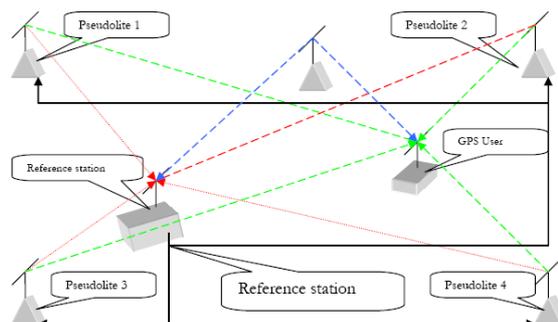


Fig. 3 Sistema pseudolite sincrono, Tipo I e Tipo II

Lo pseudolite master ha un suo proprio orologio; gli altri pseudolite hanno orologi controllati in maniera digitale che sono usati per generare il segnale. La stazione di riferimento manda il comando di sincronizzazione del clock agli pseudolite asserviti, via data link. Lo pseudolite asservito del Tipo I ha un data link per ricevere i comandi di sincronizzazione del clock dalla stazione di riferimento; quello di tipo II ha un ricevitore GPS e un modulo di computazione per generare il proprio comando di sincronizzazione del clock. Solo il Tipo I necessita della reference station. Conoscendo l'esatta posizione dello pseudolite master, della stazione di riferimento e degli pseudolite asserviti, si possono misurare gli errori di sincronizzazione del clock tra pseudolite master e asserviti. Con gli errori di misura noti, la stazione di riferimento può generare i comandi di sincronizzazione del clock. Ciascuno pseudolite asservito setta il suo proprio clock dopo il clock della master ed il sistema diventa sincronizzato. Dopo che la sincronizzazione è stata fatta, l'utente può calcolare la sua posizione. L'utente può calcolare la sua posizione senza l'uso dei messaggi di correzione dalla reference station. Ciò significa che si può rimuovere il wireless data link tra reference station e utente, che è richiesto nel sistema di navigazione pseudolite asincrono.

Fonti di errore e Segnale Pseudolite: Proprietà e Applicazioni

Lo spazio di lavoro e la distanza tra trasmettitori e ricevitori per la navigazione indoor sono molto piccoli (dell'ordine dei metri), per cui i range variano notevolmente e i livelli del segnale dello pseudolite ai ricevitori possono essere piuttosto elevati risolvendosi in alcune fonti di errori. Le due più significative fonti di errore sono il problema *near/far* e il *multipath*.

Il multipath, ormai noto in quanto presente anche per i sistemi outdoor GPS, si verifica quando parte del segnale arriva all'antenna in maniera indiretta, poiché il segnale rimbalza da soffitti e muri così il range attraversato dal segnale è più lungo, oppure quando l'interferenza del segnale tra il segnale diretto e il segnale che è riflesso altera il segnale originale. Adottando particolari antenne il modello di guadagno dell'antenna sarà focalizzato in direzione del pavimento così la potenza è maggiore in direzione di trasmissione e minore in direzione ortogonale.

Il problema *near/far* si verifica quando il ricevitore è troppo vicino o troppo lontano dallo pseudolite. Se il ricevitore sta chiudendo su uno pseudolite, i segnali dagli altri pseudolite sono disturbati dal segnale dal più vicino pseudolite. Se il ricevitore è lontano dallo pseudolite, il segnale è disturbato o debole per essere ricevuto dal ricevitore. Il problema *near/far* avviene solo quando sono usati gli pseudolite. Uno pseudolite disturberà tutti gli altri pseudolite all'interno del relativo raggio vicino. Il raggio lontano è la distanza all'interno del quale un ricevitore deve rimanere per effettuare la chiusura su quello pseudolite.

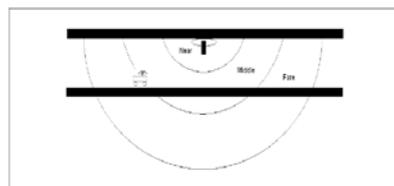


Fig. 4 Problema Near/Far

È possibile far fronte al problema basandosi sulle caratteristiche strutturali del segnale pseudolite. Lo pseudolite è un trasmettitore a terra, un generatore di segnale che genera un segnale like-GPS. Il segnale pseudolite consiste nella portante L1 a 1575.42 MHz, codice Clear/Acquisition, e può mandare un messaggio d'informazione di 50 bps. Esso usa orologio a basso costo. Gli pseudolite usano Binary Phase Shift Keying al fine di modulare l'informazione sull'onda portante. A partire dal segnale dati da trasmettere si associa ad esso un nuovo segnale, detto *Spread Spectrum*, che ha volutamente una banda molto maggiore della banda minima necessaria per trasferire quel segnale. La funzione di "allargamento" della banda del segnale viene ottenuta utilizzando un codice di spreading. Il ricevitore per riconoscere il segnale utile all'interno del segnale a spettro espanso, utilizzerà lo stesso codice usato dal trasmettitore (operazione di despreading).

Siano d_t il binary data con *symbol rate* $R_s = 1/T_s$ (o *bit rate* per BPSK) e pn_t pseudo-noise code con *chip rate* $R_c = 1/T_c$.

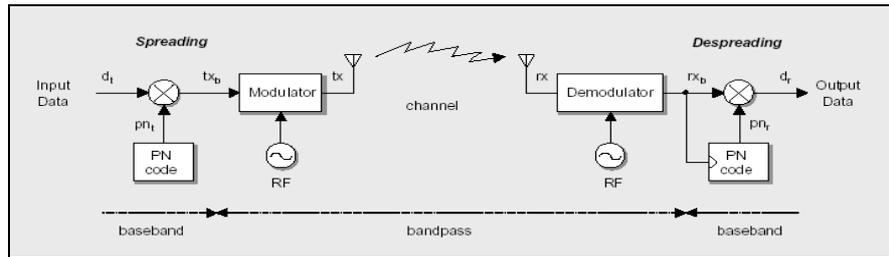


Fig. 5 Operazioni di Spreading e Despreading

Spreading. Nel trasmettitore, il binary data d_t è “direttamente” moltiplicato per la sequenza PN pn_t , che è indipendente dal binary data, per produrre il segnale a banda base trasmesso tx_b :

$$tx_b = d_t \cdot pn_t \quad [8]$$

L'effetto della moltiplicazione di d_t con una PN sequence è “allargare” la larghezza di banda R_s del d_t a quella di R_c . In *modulazione* il segnale tx_b è un segnale sagomato dalla sequenza dei simboli da trasmettere. L'ampiezza e così la potenza del segnale tx_b è la stessa come nel segnale informazione originale d_t . A causa della larghezza di banda aumentata del segnale spread spectrum la densità spettrale della potenza deve essere più bassa.

Despreading. Il segnale spread spectrum non può essere rilevato da un convenzionale ricevitore. Nel ricevitore, il segnale a banda base ricevuto rx_b è moltiplicato con la sequenza PN pn_r .

- Se $pn_r = pn_t$ e sincronizzato alla sequenza PN nel data ricevuto, allora il binary data rilevato è prodotto su d_r . L'effetto della moltiplicazione del segnale spread spectrum rx_b con la sequenza PN pn_t usato nel trasmettitore è “ridurre” la larghezza di banda di rx_b a R_s .
- Se $pn_r \neq pn_t$, allora non ci sono azioni di despreading. Un ricevitore che non conosce la sequenza PN del trasmettitore non può riprodurre il data trasmesso.

In fase di *demodulazione* se $pn_r = pn_t$ il segnale ricevuto è moltiplicato per pn_r , cioè per la stessa sequenza PN pn_t usato nel trasmettitore, sincronizzato alla sequenza PN nel segnale ricevuto rx_b . L'operazione è detta despreading perché l'effetto è quello di “annullare” l'operazione di spreading al trasmettitore. L'*output* del moltiplicatore nel ricevitore è allora (poiché $pn_r = pn_t$):

$$d_r = rx_b \cdot pn_r = (d_t \cdot pn_t) \cdot pn_t \quad [9]$$

ma essendo la sequenza PN moltiplicata per se stessa uguale a +1, allora il valore della funzione di autocorrelazione è +1, e il data signal in output è:

$$d_r = d_t \quad [10]$$

Nel caso $pn_r \neq pn_t$, il segnale ricevuto è moltiplicato per una sequenza PN pn_r , differente da quella usata nel modulatore, perciò l'output diventa:

$$d_r = rx_b \cdot pn_r = (d_t \cdot pn_t) \cdot pn_r \quad [11]$$

Per sicure comunicazioni in un ambiente multi-utente, il data trasmesso d_t non può essere scoperto da un utente che non conosce la sequenza PN pn_t usata nel trasmettitore.

Utilizzando le capacità dei processi di elaborazione dei vettori in Matlab, sono stati sviluppati le tecniche per effettuare l'espansione dello spettro: *Direct Sequence* e *Frequency Hopping*

Nella *Direct Sequence* il segnale espanso avrà l'espressione

$$x(t) = c(t)m(t)e^{j2\pi f_0 t} \quad [12]$$

dove $m(t)$ è l'involuppo complesso del segnale e $c(t)$ è una sequenza pseudocasuale, indipendente da $m(t)$, che crea uno spazio ortonormale sull'intervallo $[0, T_b]$ in quanto il prodotto scalare vale

$$\frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} c_i(t)c_j(t)dt = \delta_{ij} \quad [13] \quad \text{con } \delta_{ij} \text{ che vale } 0 \text{ per } i \neq j \text{ ed } 1 \text{ per } i = j$$

L'espansione dello spettro è ottenuta correlando la sequenza di informazione in banda base con una sequenza pseudo-noise (spreading code) avente frequenza di simbolo molto maggiore rispetto alla sequenza stessa di informazione. Questo meccanismo produce l'effetto di distribuire lo spettro del segnale su una banda tanto più ampia quanto più lunga è la sequenza pn utilizzata.

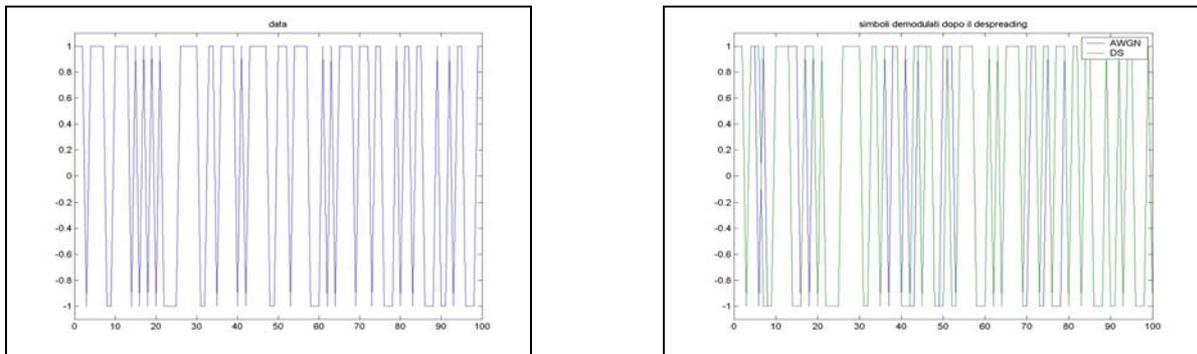


Fig. 6 DSSS. Dopo il despreading il segnale utile è compresso nella sua banda originale, mentre i segnali degli altri utenti rimangono scorrelati

Nella Frequency Hopping l'espansione dello spettro è ottenuta facendo "saltare" la porzione di banda che il segnale occupa in banda base su un certo numero di frequenze portanti, scelte in base ad una logica regolata da una sequenza pn, nota solo al trasmettitore ed al ricevitore interessati alla comunicazione in atto.

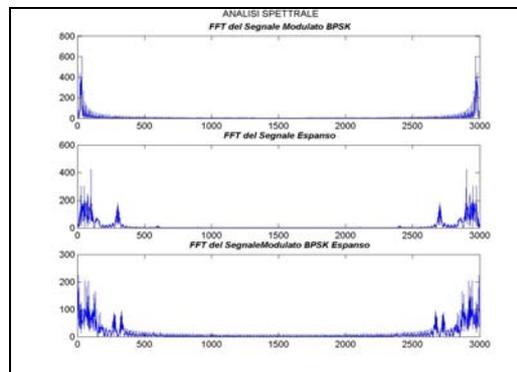


Fig. 7 Frequency Hopping. L'allargamento dello spettro garantisce l'immunità ai disturbi e alle interferenze

Conclusioni

Questo lavoro conduce alla concreta considerazione che la navigazione indoor è possibile con lo sviluppo delle tecniche di posizionamento con l'uso di pseudolite e l'apparecchiatura dell'utente GPS. I test e le simulazioni, in ambiente Matlab, confermano le proprietà di un segnale pseudolite, ma soprattutto hanno evidenziato come l'uso delle tecniche Direct Sequence Spread Spectrum e Frequency Hopping riducano fortemente gli effetti prodotti dal multipath e dal problema near/far e, in particolare, riducano le interferenze che affliggono il segnale utile, sia l'interferenza che lo stesso segnale utile provoca sulle altre comunicazioni in corso.

Bibliografia

- [1] H. Stewart Cobb, *GPS Pseudolites: Theory, Design, And Applications*, Ph.D dissertation of AA, Stanford University, 1997.
- [2] Vlad Badea, Rikard Eriksson, *Indoor navigation with pseudolite*, Department of Science and Technology, Sweden, 2005

[3] J. Meel, *Spread Spectrum (SS)*, Sirius Communications – Rotselaar – Belgium, 1999.