

## GPS – GLOBAL POSITION SYSTEM

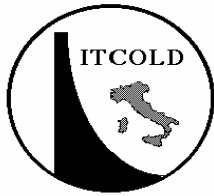


GRUPPO DI LAVORO ITCOLD

**Metodi innovativi per il monitoraggio delle dighe e dei versanti e possibili futuri sviluppi.**

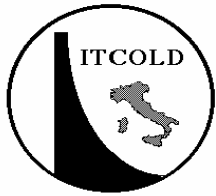
Dott. Ing. A. MASERA (CESI –ISMES)  
Dott. Ing. S. M. COLLI (CVA SpA)  
Dott. Ing. F. BIRINDELLI (Studio PIETRANGELI)  
Dott. Ing. F. SAINATI (EDISON)  
Dott. Ing. P. VALGOI (AEM SpA)

**Dicembre 2007**



## INDICE

1.	<i>Premessa</i>	3
2.	<i>Sistemi di Navigazione Satellitare</i>	3
3.	<i>Introduzione al GPS</i>	4
4.	<i>Evoluzione del sistema GPS</i>	6
	<i>GPS Differenziale (DGPS)</i>	7
	<i>GPS Fase Portante (Carrier-Phase)</i>	9
5.	<i>Applicazioni del GPS nel Monitoraggio degli spostamenti nelle dighe</i>	9
6.	<i>Conclusioni</i>	15
	<i>APPENDICE A I segnali del GPS</i>	16
	<i>APPENDICE B La correzione degli errori nel GPS Differenziale</i>	19
	<i>APPENDICE C La correzione degli errori nelle misure di fase con il GPS</i>	20
	<i>Bibliografia</i>	23



## 1. **Premessa**

L'obiettivo di queste pagine è quello di valutare la possibilità di impiegare operativamente le misure di posizionamento offerte dal sistema GPS nel monitoraggio degli spostamenti delle dighe, facendo il punto sulle tecniche che si sono rese disponibili nel corso di quest' ultimo decennio.

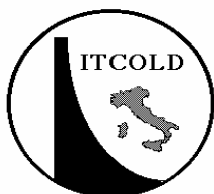
L'attività è condotta nell'ambito del gruppo di lavoro ITCOLD "Metodi innovativi per il monitoraggio delle dighe e dei versanti e possibili futuri sviluppi" istituito nell'inverno 2004/2005.



Figura 1 – Diga di Beauregad: Rete monitoraggio GPS – Punto di riferimento

## 2. **Sistemi di Navigazione Satellitare**

GNSS (Global Navigation Satellite System) è l'acronimo per indicare un generico sistema di navigazione satellitare in grado di fornire a un ricevitore elettronico le coordinate spaziali (latitudine, longitudine e altezza s.l.m.) del punto in cui è posizionato, su un qualunque punto del globo. L'informazione della posizione, trasmessa via elettromagnetica e quindi lungo la linea di vista ricevitore satellite, deve essere inoltre fornita con un errore dell'ordine di pochi metri.



A tutt'oggi, l'unico GNSS operativo al 100% è quello americano noto come NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System).

Il sistema russo GLONASS è in fase di manutenzione e ripristino, mentre la Cina ha dichiarato che intende espandere a livello globale il suo sistema di navigazione regionale Bei Dou.

Sono inoltre in fase di sviluppo versioni di GNSS di nuova generazione, quali l'europeo Galileo, previsto operativo per il 2010 e l'indiano IRNSS, previsto per il 2012.

### 3. *Introduzione al GPS*

Il GPS, nell'utilizzo corrente tramite i ricevitori più diffusi in commercio, fornisce indicazioni di posizione con una precisione dell'ordine della decina di metri in condizioni cinematiche e dell'ordine del metro in condizioni statiche. In questo caso si dice che si effettuano con il GPS misure di **pseudo-range**.

Il sistema GPS si avvale di un insieme di 24 satelliti distribuiti intorno al globo, su orbite definite e controllate, in modo che da qualsiasi punto del globo risultano contemporaneamente visibili più di 3 satelliti .

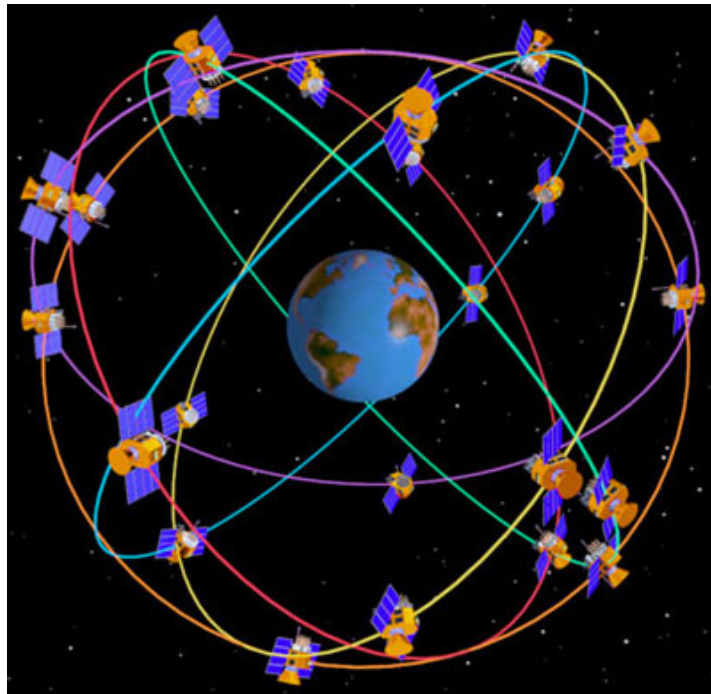
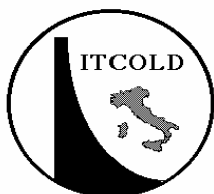


Figura 2 – Sistema GPS: Segmento spaziale – costellazione di 24 satelliti

Essi trasmettono segnali ad alta frequenza secondo uno standard predefinito e il principio di funzionamento del sistema è basato sulla misura della distanza dal ricevitore di più satelliti



contemporaneamente. Infatti, una volta note a un dato istante le coordinate  $X_i, Y_i, Z_i$  di 4 satelliti (l'indice "i" può così assumere i valori da 1 a 4), le 4 distanze ricevitore-satelliti  $D_i$  possono considerarsi i raggi di altrettante ipotetiche sfere centrate sui relativi satelliti e la posizione  $X_p, Y_p, Z_p$  del ricevitore deve trovarsi nel punto di intersezione delle 4 sfere <sup>(1)</sup>.

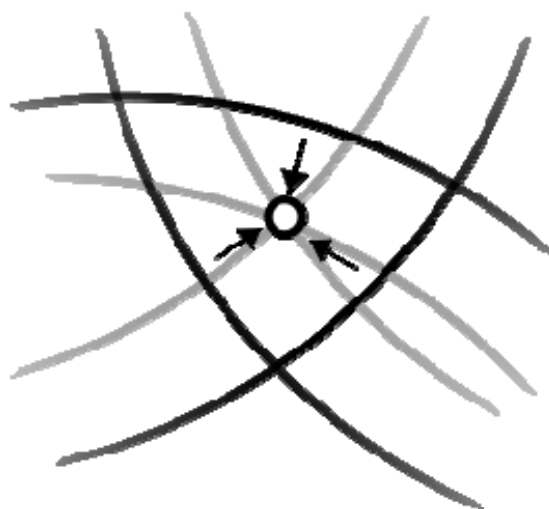


Figura 3 – Sistema GPS: Determinazione del punto incrocio di tre sfere

Le relazioni analitiche che descrivono una geometria di questo tipo e sviluppate dall'elettronica dei ricevitori, sono date dalle 4 equazioni

$$D_i = \sqrt{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2 + (Z_p - Z_i)^2} \quad 1)$$

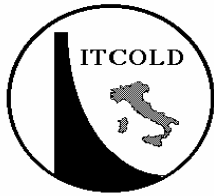
nelle sole 3 incognite  $X_p, Y_p, Z_p$ . Infatti, si suppongono note le coordinate di posizione dei satelliti  $X_i, Y_i, Z_i$  - nonché la distanza  $D_i$

$$D_i = c \Delta t_i, \quad 2)$$

pari al prodotto della velocità della luce  $c$  per il tempo  $\Delta t_i$  impiegato dai segnali elettromagnetici a effettuare il tragitto satellite-ricevitore.

<sup>1</sup> L'intersezione di due sfere è un cerchio e l'intersezione del cerchio con la terza sfera individua due punti. In genere l'ambiguità dovuta alle 2 soluzioni è già superabile esaminando i valori ottenuti, in quanto uno dei due è certamente incongruente, risultando o sotto la superficie terrestre o in quota. Comunque la quarta sfera consente di eliminare quest'ultima incertezza.





Si ha quindi una equazione in più rispetto alle incognite ma la quarta equazione elimina l'ambiguità insita nella risoluzione della relazione di secondo grado implicita nella rappresentazione della 1).

In realtà poi le cose sono un po' più complicate, in quanto le orbite non sono note con precisione assoluta e la misura della distanza, che secondo la 2) si tramuta in una misura di intervallo di tempo, presuppone sia possibile sincronizzare i satelliti con il ricevitore a terra in modo da conoscere esattamente l'istante di invio del segnale elettromagnetico per determinarne il tempo  $\Delta t_i$  di propagazione.

Se si aggiunge anche la considerazione che la propagazione di segnali nell'atmosfera non solo non avviene esattamente in linea retta ma anche con velocità diversa da  $c$ , ne consegue che nei ricevitori standard la determinazione delle coordinate è approssimata nell'ordine di una decina di metri, se il ricevitore è in movimento, e si riduce a qualche metro solo se il ricevitore è in quiete.

Per ulteriori dettagli e approfondimenti sulle caratteristiche tecniche GPS si rinvia all' Allegato A.

#### **4. Evoluzione del sistema GPS**

Fortunatamente, dopo anni di funzionamento del sistema, ricorrendo a tecniche di elaborazione dei segnali GPS disponibili, si possono ottenere con ricevitori più sofisticati risultati assai più brillanti, nell'ordine dei millimetri per ricevitori statici <sup>(2)</sup>.

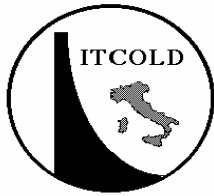
Una prima tecnica, chiamata **GPS Differenziale**, richiede l'utilizzo di almeno due ricevitori a terra: in sintesi, uno dei due ricevitori è adibito a tenere sotto controllo le variazioni dei segnali GPS, a calcolare le debite correzioni e a trasmetterle al secondo che se ne avvale per effettuare una misura di posizione più precisa.

Una seconda tecnica, chiamata **GPS Fase Portante (Carrier-Phase)**, utilizza per migliorare la misura la portante  $L_1$  del segnale GPS. Quest'ultima come si vede nell'appendice A, ha una frequenza di 1575,42 MHz (lunghezza d'onda  $\lambda \cong 19$  cm), molto più elevata dei segnali GPS che la modulano e può così dar luogo a misure di campionamento spaziale e temporale assai precise.

Infine, l'industria aeronautica americana (tramite la FAA) ha sviluppato una integrazione al GPS, denominato WAAS (Wide Area Augmentation System): essa introduce, oltre a un certo numero di basi a terra, l'impiego di un satellite stazionario aggiuntivo che, collegandosi con i satelliti della costellazione GPS, ne ricava le correzioni tramite tecnica differenziale e le trasmette ai ricevitori (modificati, rispetto a quelli tradizionali) a bordo di aerei che possono così effettuare anche atterraggi strumentali, che risulterebbero troppo rischiosi se affidati ai solo 4 satelliti utilizzati dai ricevitori tradizionali.

---

<sup>2</sup> Le posizioni per corpi in movimento sono soggette a errori maggiori, ma poiché la loro misura riguarda una casistica che in questa sede non interessa, nel seguito non sarà oggetto di approfondimenti.



La copertura del servizio è ovviamente limitata al solo continente nord americano. La precisione nella localizzazione tramite WAAS è inferiore ai 3 m.

Anche in Europa, sulla falsariga del WAAS, ma non legata a finalità aeronautiche, è stata realizzata una rete integrativa con satellite geostazionario e con basi a terra, per offrire un servizio che migliori le prestazioni fornite dal GPS.

La rete integrativa europea si chiama EGNOS: European Geostationary Navigation Overlay System, ovvero sistema geostazionario europeo di navigazione in sovrapposizione (al GPS) ed è in grado di integrare anche il funzionamento dei ricevitori del sistema GLONASS. Probabilmente con l'avvento del progetto Galileo EGNOS potrebbe essere dismessa.

La precisione nella localizzazione fornita da EGNOS è di circa 1 m, per cui non risulta al momento competitiva per le esigenze di sorveglianza geologica.

Da osservare che le prestazioni offerte da WAAS e EGNOS sembrano oggi poca cosa, ma va detto che esse fornivano quest'ordine di precisione anche quando il GPS era affetto dall'errore volutamente inserito dal Dipartimento della Difesa Americano (v. Appendice A).

Altre realtà regionali, come già accennato, sono presenti in India, Giappone e Cina.

## 5. GPS Differenziale (DGPS)

Un ricevitore GPS standard riceve segnali che sono affetti inevitabilmente da errori di natura sia sistematica (*bias*) e sia casuale che possono così riassumersi:

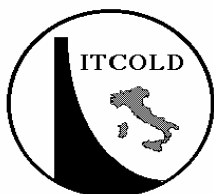
1. Sfasamento tra gli orologi dei satelliti e quello del ricevitore: ad esempio, uno sfasamento di 10 nanosecondi ( $10^{-8}$  s) si traduce in un errore di distanza ricevitore-satellite dell'ordine di circa 3 m<sup>(3)</sup>.
2. Errori nelle effemeridi<sup>(4)</sup>, ovvero nei parametri che identificano l'orbita di ciascun satellite. Ne consegue una incertezza nel calcolo della distanza satellite-ricevitore dell'ordine di diversi metri.

---

<sup>3</sup> I nanosecondi qui citati non vanno confusi con la precisione dell'orologio, espresso generalmente come sfasamento nel corso di un anno. Ovviamente qui s'intende che lo sfasamento di  $10^{-8}$  s si realizzi nel corso dell'intervallo di tempo richiesto per riconoscere il segnale di sincronizzazione trasmesso dal satellite come codice pseudo-casuale C/A (v. Appendice A). Quest'ultimo modula a 1,023 MHz la portante (avente frequenza 1540 volte maggiore), per cui ogni bit del codice pseudo-casuale (composto da 1023 bit) si presenta quasi ogni microsecondo ( $10^{-6}$  s). Dieci nanosecondi di sfasamento rappresentano pertanto una deriva di una parte su cento e rappresenta un buon valore per l'elettronica impiegata nei ricevitori.

Vi sono inoltre, molto più trascurabili, gli errori di sfasamento tra gli orologi dei diversi satelliti, che vengono controllati e corretti dalle 5 stazioni di controllo a terra.

<sup>4</sup> Vanno sotto il nome generico di effemeridi le caratteristiche orbitali di un oggetto celeste. In questo caso le effemeridi sono fornite nei segnali trasmessi dallo stesso satellite, sulla base della sua orbita calcolata e aggiornata periodicamente dalle stazioni a terra per la manutenzione del sistema GPS. Il GPS Master Control Station, localizzato nella base militare Schriever in Colorado Springs, Colorado - USA, può anche intervenire a correggere le orbite comandando l'accensione di appositi razzi di controllo di cui i satelliti sono dotati.



3. Errori dovuti alla propagazione del segnale nell'attraversamento dell'atmosfera terrestre. Le distorsioni indotte dalla ionosfera e dalla troposfera, nonché la diversa velocità di propagazione del segnale rispetto a quella nel vuoto, comportano anche in questo caso errori di valutazione della distanza satellite-ricevitore dell'ordine della decina di metri.
4. Errori detti di Multipath si verificano quando il ricevitore riceve non solo il segnale diretto trasmesso dal satellite ma anche segnali addizionali dovuti a riflessioni dello stesso segnale da parte di ostacoli naturali o artificiali posti nei pressi del ricevitore. E' l'analogo delle immagini doppie o anche multiple che si possono vedere in TV, quando l'antenna riceve e amplifica le onde riflesse dagli edifici vicini. I segnali riflessi effettuano per loro natura percorsi più lunghi di quelli diretti, alterando i tempi di sincronizzazione. Ricevitori avanzati sono in grado di risolvere questo problema utilizzando il primo segnale ricevuto da ciascun satellite e scartando quelli ritardati.

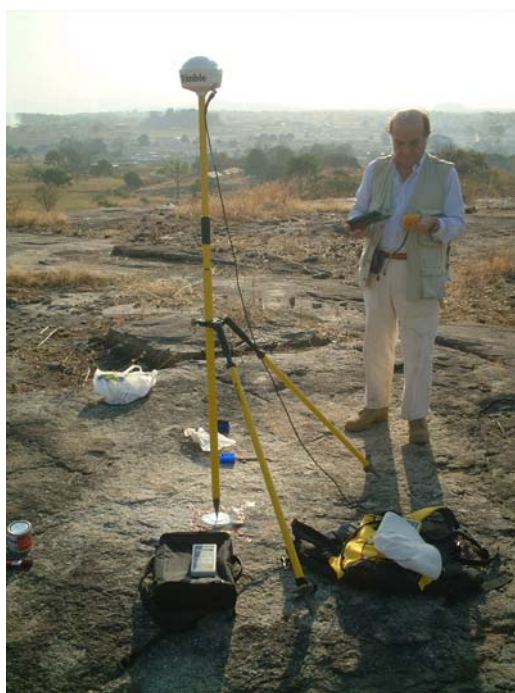
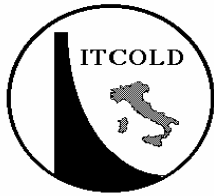


Figura 4 – GPS Differenziale: Survey BWARI ( Nigeria ) - novembre 2000

Se si installa un ricevitore in una posizione fissa, questo, nel tempo, contattando tutti i satelliti disponibili è in grado di stabilire, mediando nel tempo e adottando metodi statistici appropriati, un valore molto preciso della propria posizione. Esso viene così messo in condizioni di ovviare globalmente agli errori su elencati e, assumendo esatte le coordinate di posizione ottenute, di calcolare per ogni satellite i tempi effettivi di propagazione dei rispettivi segnali.

Comunicando la lista degli errori così calcolati per ciascun satellite a un secondo ricevitore, che può muoversi nei dintorni fino a distanze non superiori al centinaio di Km, distanze per le quali i





contributi degli errori di tipo 3 non differiscono sensibilmente da quelli che affliggono il ricevitore fisso, il ricevitore mobile è in grado di applicare in tempo reale le correzioni associate ai satelliti utilizzati e ottenere risultati molto più precisi.

Sempre relativamente agli errori di tipo 3, i moderni ricevitori GPS sono in grado di escludere automaticamente quei satelliti eventualmente agganciati che risultassero però troppo bassi sull'orizzonte, per i quali cioè i segnali risulterebbero disturbati da un percorso atmosferico eccessivo.

Nell'Appendice B sono riportate ulteriori notizie relative alle procedure analitiche adottate per la riduzione degli errori con il DGPS.

Già oggi molte istituzioni nazionali realizzano gratuitamente stazioni fisse e distribuiscono le informazioni di correzione via radio ad utilizzatori (naviganti, Protezione Civile, topografi) che dispongono della strumentazione GPS adatta e che comunque non si allontanano dalla stazione fissa oltre il limite del centinaio di Km. Questo è il caso della rete EGNOS già citata.

## **6. GPS Fase Portante (Carrier-Phase)**

Ricevitori GPS adibiti al controllo degli spostamenti di natura geologica richiedono precisioni dell'ordine della frazione di centimetro, non compatibili con le soluzioni finora esaminate.

L'idea alla base di questa ulteriore evoluzione dell'utilizzo del GPS è quella di sfruttare, per la determinazione della distanza ricevitore-satellite, non tanto i dati delle effemeridi, inviati dal satellite tra i dati del segnale C/A<sup>5</sup>, e le relative correzioni quanto la portante L1 stessa. Infatti, a oltre 1,5 GHz la lunghezza d'onda del segnale portante denominato L1 è di circa 19 cm, per cui, una volta avviata la sincronizzazione del ricevitore con l'orologio a bordo del satellite, è sufficiente contare il numero di cicli di portante che pervengono nell'intervallo  $\Delta t_i$  (v § 3) per ottenere una valutazione della distanza con un errore che è contenuto in una frazione di lunghezza d'onda.

Si elabora in sostanza la differenza di fase che si rileva nel segnale portante nel corso della misura del tempo di propagazione dei segnali. Applicando metodi differenziali e statistici, si possono ottenere appunto precisioni subcentimetriche.

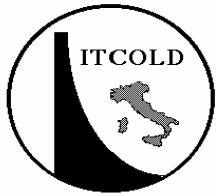
L' Appendice C contiene ulteriori precisazioni e notizie tecniche relative a questa variante nell' uso del GPS.

## **7. Applicazioni del GPS nel Monitoraggio degli spostamenti nelle dighe**

Il controllo di integrità delle strutture di ingegneria, ovviamente non solo nel caso delle dighe, richiede misure di spostamenti con elevata precisione e possibilmente in tempo reale.

---

<sup>5</sup> Vedi nota 4 e Appendice A.



Una ricerca sulle applicazioni del GPS o per lo meno sugli studi di valutazione circa l'opportunità di utilizzare il GPS nel controllo degli spostamenti delle dighe ha fornito gli esempi che seguono.

### ***Pacoima Dam, California, USA [1]***

La diga, situata nei monti San Gabriel, è stata costruita nel 1928 ed è alta 113 m. Essendo stata danneggiata dai terremoti del 1971 e 1994, si è ritenuto opportuno procedere a un monitoraggio continuo della sua stabilità tramite un impiego continuo del GPS.

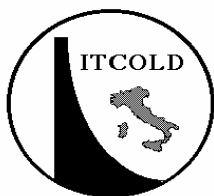
Nel 1995 furono perciò installati 3 ricevitori GPS, operanti senza interruzione, per rilevare spostamenti della diga rispetto a una stazione fissa distante 2.5 Km. I segnali GPS prevedevano un campionamento ogni 30 s e pertanto non erano utilizzabili per rilevare gli spostamenti nel corso di un evento sismico, ma solo per verificare la presenza di spostamenti statici, eventualmente successivi a un terremoto.



Figura 5 – Pacoima Dam: Stazioni GPS per monitoraggio in continuo ( foto by J. Galetzka )

I dati, memorizzati nel computer della stazione fissa, venivano trasmessi una volta al giorno al centro operativo dell' USGS-SCIGN (US Geological Survey-Southern California Integrated Gps Network).

E' stato successivamente commissionato uno studio per ottenere un monitoraggio effettivamente in tempo reale, rilevando con frequenza superiore a 1 Hz spostamenti aventi risoluzioni inferiore al cm ( di questo studio non sono disponibili ulteriori informazioni).



### *Diamond Valley Lake Dams [2]*

Si tratta di un complesso di 3 dighe in terra che contornano su 3 lati il lago Diamond, il maggior bacino presente nella California del Sud, situato a 160 Km a sud-est di Los Angeles, USA. Le 3 dighe sono state completate nel dicembre 1999 e il riempimento del bacino, nell' ottobre del 2001 ha raggiunto il 60%.

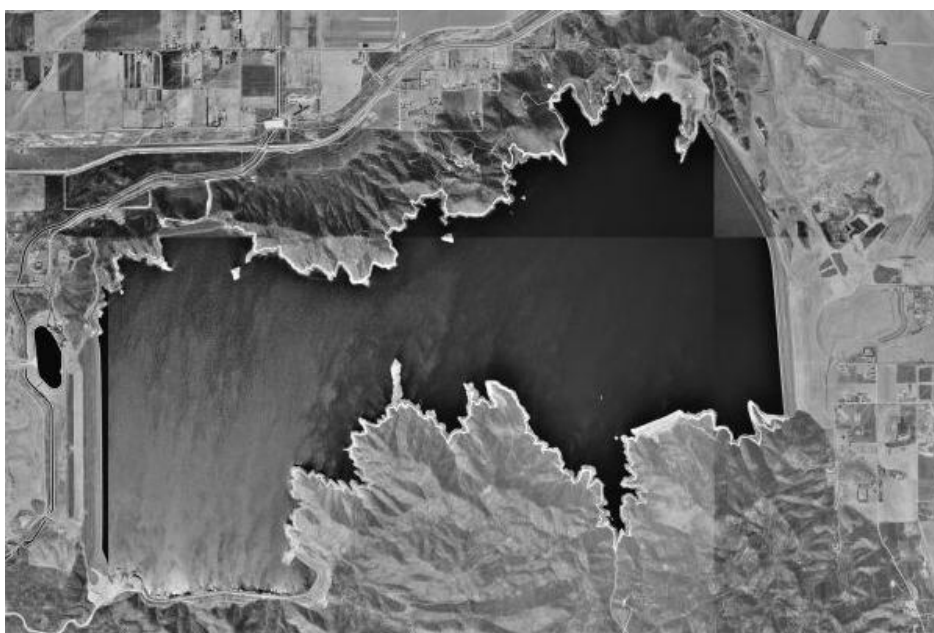


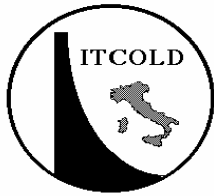
Figura 6 – Diamond Valley Lake Dam: foto da satellite ( by USGS )

L'esigenza di garantire la sicurezza dell'impianto, compito assegnato al Metropolitan Water District della California del Sud, ha trovato subito difficoltà nel monitorare una struttura così vasta con un numero di persone molto esiguo, peraltro addestrate a effettuare verifiche visive e strumentali periodiche di impianti simili ma molto più piccoli.

La ricerca di un metodo automatizzato di controllo ha inizialmente preso in considerazione l'installazione di ricevitori GPS. Ma dato l'elevato numero dei punti da tenere sotto controllo questa soluzione è stata valutata troppo costosa. Si è così optato per stazioni provviste di prismi e progettate in modo che da un sola postazione fosse possibile controllare molti punti.

Successivamente, introducendo del software di controllo appropriato la sequenza delle misure alle varie scadenze è stato programmato automaticamente senza richiedere più intervento umano.

Complessivamente sono state realizzate 8 stazioni robotizzate in grado di rilevare spostamenti maggiori o uguali di 1 cm su una serie di punti prestabiliti e con almeno 2 punti traggurdati da ogni 2 stazioni adiacenti. I dati accumulati in automatico vengono elaborati da programmi ad hoc e trasmessi a un ufficio di sorveglianza posto a 100 Km dalle dighe.



### ***Thesarus Dam [3]***

La diga Thesarus si trova nel nord della Grecia, a circa 200 Km a nord-est di Salonicco. Realizzata in terra, è stata completata nel 1995. La sua massima altezza raggiunge i 175 m, con una cresta lunga 400 m. Il bacino da essa racchiuso si estende per 18 Km<sup>2</sup>.

Per tenere sotto controllo il suo comportamento strutturale, la società pubblica di energia, che ne è proprietaria, ha installato una rete geodetica composta da 6 punti di riferimento e 26 punti di controllo.

I punti di riferimento, che distano non più di 800 m dalla diga, sono dei pilastri cilindrici in calcestruzzo di 40 cm di diametro e 1 m di altezza.

I punti di controllo, della stessa forma ma più piccoli, sono tutti posizionati lungo la cresta, lato valle. Sono state effettuate 2 campagne di rilevazioni GPS, una nel 2003 e l'altra nel 2005, ciascuna della durata di 2 giorni e utilizzando 8 ricevitori in grado di acquisire entrambe le portanti L1 e L2 per una misura di fase.

I 6 punti di riferimento sono stati combinati con i diversi punti controllo a formare basi lineari di osservazione della lunghezza compresa tra i 200 e gli 800 m.

Le informazioni acquisite, sottoposte a elaborazione successiva, hanno dato come risultato la presenza di uno spostamento orizzontale uniformemente distribuito, dell'ordine di 1 cm e uno verticale più accentuato, dell'ordine di 3.5 cm.

### ***Diga di Beauregard [4]***

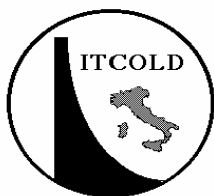
La diga di Beauregard è ubicata in Valgrisenche, Val d'Aosta, sul fiume Dora. La diga, costruita tra il 1951 e 1959, è del tipo ad arco gravità a doppia curvatura di altezza massima 132 m, con uno sviluppo del coronamento pari a 394 m e crea un invaso di 72 Mm<sup>3</sup> alla quota di massimo invaso (1772 m.s.m.).

Il versante occidentale dell' invaso presenta instabilità che fu individuata sin dalla fase di scavo delle fondazioni della diga, ma solo successivamente è stato possibile determinarne l' ampiezza, monitorando il fenomeno con strumenti di diversa tipologia. Sono state infatti effettuate nel tempo misurazioni degli spostamenti del versante utilizzando:

1. una rete di trilaterazione topografica (dati disponibili dal 1967);
2. pendoli rovesci (dati disponibili dal 1968 al 2002);
3. una rete GPS (dati disponibili dal 1995 al 2001);
4. rilevazione SAR<sup>6</sup> (dati disponibili dal 1991 - utilizzati dal 1993 al 1999).

---

<sup>6</sup> SAR è l'acronimo per Synthetic Aperture Radar e si riferisce all'acquisizione di immagini del suolo riprese da satelliti del tipo ERS dell'Agenzia Spaziale Europea. La tecnica SAR è descritta molto bene nei Rapporti CESI di cui alla bibliografia [4].



La rete GPS ( oggetto di questa scheda ) è costituita da 20 capisaldi installati sul versante sinistro dell'invaso di Beaugard :

- 16 sulla frana di Beaugard di cui 3 ( Scavarada, P1 e GPS3 ) ubicati esternamente alla zona interessata dalla frana;
- 4 sulla frana di Mont Pela.

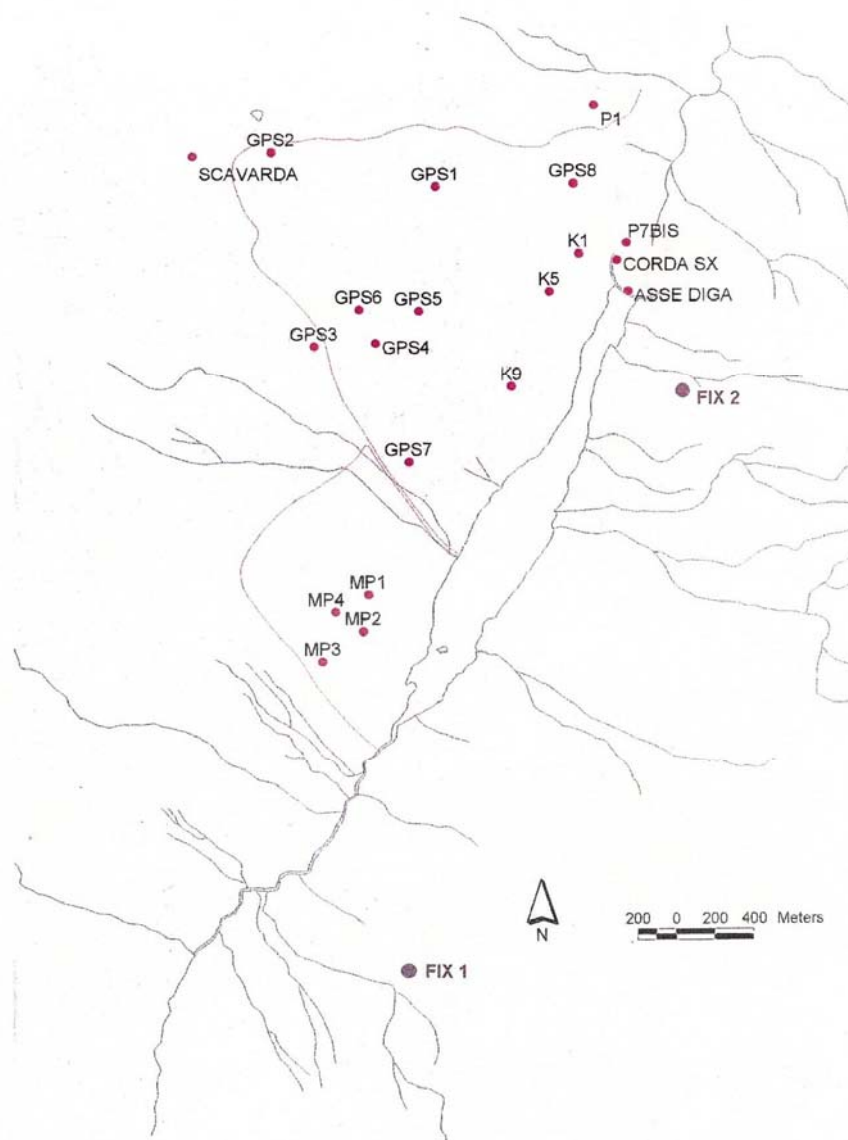
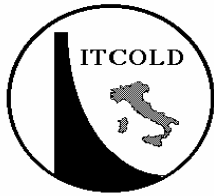


Figura 7 – Diga di Beaugard: Vertici Rete GPS

Per determinare l'entità e la direzione degli spostamenti, la rete è stata completata con due punti di riferimento ubicati sul versante destro ( FIX 1 e FIX 2 ).





La determinazione della posizione relativa e quindi l'eventuale spostamento di ogni caposaldo, è stata effettuata mediante trilaterazione collegandoli ad entrambi i punti di riferimento dai quali vengono calcolate distanze e dislivelli.

Per la compensazione della rete sono state utilizzate tutte le basi di misura registrate. Le campagne di rilevamento effettuate con GPS sono state eseguite da ISMES e prevedevano due letture l'anno nei mesi di luglio e novembre.

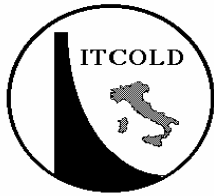


Figura 8 – Diga di Beauregard: Caposaldo gps1

Ad ogni campagna vengono determinate le coordinate planimetriche e la quota dei vertici rispetto ai punti di riferimento posizionando contemporaneamente sui capisaldi e sui punti fissi, per circa 1,5 ore, i ricevitori GPS ed eseguendo misure di fase portante e differenziali.

Le precisioni teoriche sono confermate dai rilievi.





## **8. Conclusioni**

Rispetto alla precisione fornita dal GPS nella fase iniziale del suo funzionamento vi sono stati in pochi anni miglioramenti di oltre 2 ordini di grandezza.

Scegliendo il giusto tipo di ricevitore, curando il suo posizionamento e dotandosi dell' hardware e software opportuni le misure di posizione possono effettuarsi con una precisione in tempo reale di 1 cm in orizzontale e 2 cm in verticale.

Elaborando successivamente (elaborazioni batch) le registrazioni di una serie di misure si possono raggiungere precisioni di 2-4 mm in orizzontale e 6-8 mm in verticale.

Al momento non sembra vi siano molte soluzioni che, per il monitoraggio strutturale delle dighe, implementino il GPS operativamente e in modo soddisfacente, mentre è molto diffusa la metodologia per il controllo dei versanti. In tali applicazioni il sistema GPS affianca il rilievo topografico tradizionale [v.7].

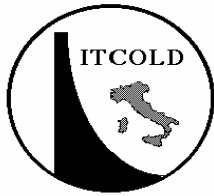
Un aspetto a favore dell'applicazione GPS è che non necessita di intervisibilità tra i capisaldi e può funzionare con qualsiasi condizione atmosferica. L'applicabilità è in parte limitata dalla "visibilità" dei satelliti

Lo studio relativo alle dighe di Diamond Valley etichetta come costose le soluzioni GPS rispetto a quelle tradizionali utilizzando stazioni topografiche.

In effetti metodi più tradizionali, con l'impiego di strumentazione ottica moderna, dà oggi in assoluto precisioni nelle misure di posizione molto superiori a quelle ottenibili con il GPS [v. 5].

L'impressione però è che la tendenza stia per cambiare. L'impiego di strumenti ottici richiede infatti investimenti non trascurabili e manutenzioni particolari.

Segnali a favore di soluzioni GPS nell'immediato futuro provengono invece dalla forte espansione dello sviluppo di sistemi satellitari di nuova generazione per localizzazione e dalla ormai confermata decennale tendenza da parte della tecnica elettronica e della produzione del software di proporsi al mercato con costi che si muovono controcorrente rispetto alla media dei beni e servizi e ciò che 5 anni fa (come lo studio per le dighe di Diamond Valley) poteva risultare costoso oggi può risultare conveniente.



## **APPENDICE A    I segnali del GPS**

Il sistema di posizionamento globale NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System) è un sistema in grado di fornire informazioni molto precise sul tempo e sulla posizione terrestre; esso fu avviato negli Stati Uniti a partire dagli anni '70 e venne completato nel 1993.

Nasce per rispondere all'esigenza del Ministero della Difesa Americano di poter seguire il percorso di mezzi militari sulla terraferma ed in mare in modo da consentire in ogni momento, individuata la posizione, eventuali operazioni di supporto e di salvataggio.

Il sistema GPS funziona grazie a tre componenti generalmente indicate con il nome di segmenti: *segmento spaziale, segmento di controllo, segmento di utilizzo o utente.*

Il segmento spaziale è costituito da una costellazione di 24 satelliti artificiali, distribuiti su sei piani orbitali egualmente spazati in longitudine di 60° e inclinati di 55° rispetto al piano equatoriale.

Le orbite possono considerarsi circolari con un raggio di circa 26000 km dal centro della terra. Il periodo di rivoluzione è di 12 ore siderali ovvero, a causa della differenza tra giorno sidereo e giorno solare medio, di 11 ore e 58 minuti e le orbite sono state studiate in modo che ogni punto della terra venga visto da almeno 4 satelliti contemporaneamente.

Ogni satellite, la cui vita media di progetto è di circa 8 anni, possiede il seguente equipaggiamento:

- quattro oscillatori ad altissima precisione di cui 2 al cesio e 2 al rubidio
- razzi per la correzione dell'orbita
- pannelli solari per la produzione di energia elettrica
- batterie di emergenza per garantire l'apporto di energia quando il sole è eclissato

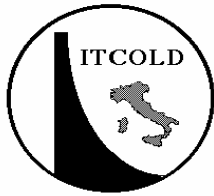
Le informazioni ricevute dai satelliti vengono fornite dalle stazioni di controllo, che sono le uniche in grado di trasmettere segnali ai satelliti.

Il segmento di controllo a sua volta è costituito da 5 stazioni a terra, all'incirca equidistanti lungo l'equatore e di posizione nota con grande precisione.

Esistono tre tipi di stazione a seconda della funzione da svolgere: le Monitor Stations (MSs), la Master Control Station (MCS) e le Ground Control Stations (GCS).

Tutte sono equipaggiate di apparecchiature in grado di ricevere di continuo i segnali che provengono dai satelliti e di misurare i parametri atmosferici.

La stazione principale di controllo, situata a Colorado Springs, raccoglie tutti i dati registrati alle MSs; sulla base di questi, mediante l'utilizzo di opportuni modelli, essa è in grado di effettuare la



correzione degli errori dovuti alla deriva degli orologi satellitari e di determinare le effemeridi dei satelliti (effemeridi predette o Broadcast Ephemerides).

Vengono quindi eventualmente corretti gli orologi e comandati i razzi che consentono la correzione dell'orbita nominale dei satelliti.

Le stazioni CGS sono quelle che permettono il collegamento tra la stazione MCS e il segmento spaziale: tramite queste infatti vengono inviati ai satelliti i dati di navigazione aggiornati.

Per segmento di utilizzo si intendono sia gli utenti militari sia quelli privati: le caratteristiche dei ricevitori sono in funzione degli usi e della precisione che si intende raggiungere.

Il segnale trasmesso dai satelliti è costituito da due onde portanti modulate mediante tre codici binari.

La frequenza delle due portanti è ottenuta da una stessa frequenza fondamentale  $f_0 = 10.23$  MHz, generata da quattro oscillatori di alta precisione.

Le due portanti, indicate con il nome di L1 e L2, hanno le seguenti caratteristiche:

L1: frequenza  $f_1 = 154 f_0 = 1575.42$  MHz, lunghezza d'onda  $\lambda_1 = 19$  cm

L2: frequenza  $f_2 = 120 f_0 = 1227.60$  MHz, lunghezza d'onda  $\lambda_2 = 24$  cm

Tali frequenze sono state scelte semplicemente per il fatto di essersi dimostrate sperimentalmente scarsamente perturbabili nella fase di attraversamento della ionosfera e della troposfera.

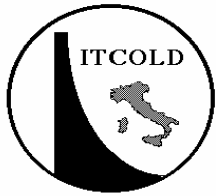
La determinazione della distanza satellite-ricevitore è in generale ottenibile generalmente in due modi: mediante una misura di tempo ovvero mediante una misura di differenza di fase.

Entrambe le portanti L1 e L2 vengono utilizzate per il calcolo della distanza in base alla differenza di fase, che si è dimostrata tipicamente più precisa rispetto a quella di tempo.

Esistono tre codici mediante cui vengono modulate tali portanti: il codice P, il codice C/A e il codice D.

I codici binari P e C/A permettono la determinazione della distanza mediante una misura di tempo e sono utilizzati soprattutto nel posizionamento di navigazione.

Il codice P, ottenuto dalla modulazione sia della portante L1 sia della portante L2, trasmette 10.23 Mbps e su di esso si basa la modalità del segnale trasmesso denominata PPS (Precise Positioning Service), che fornisce un elevato grado di precisione nel posizionamento assoluto per la navigazione. Questo è però un servizio non accessibile all'utenza civile, poiché il codice P, acquisito dai ricevitori di uso comune, è il segnale criptato del codice Y utilizzabile solo dai militari con particolari decoder. Questa tecnica prende il nome di Anti-Spoofing (AS).

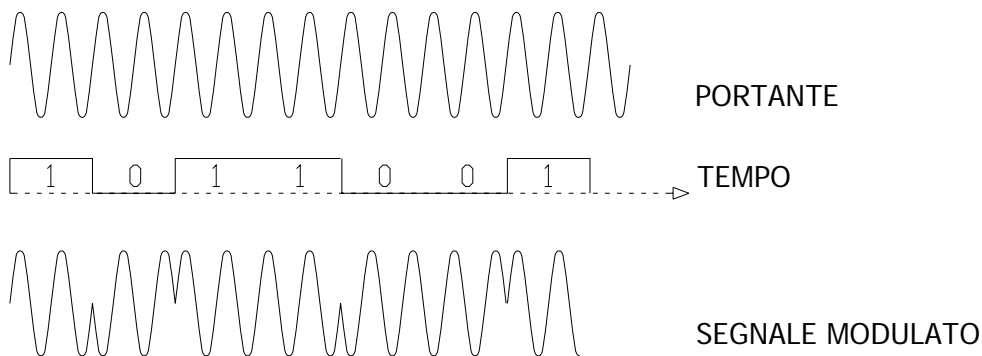


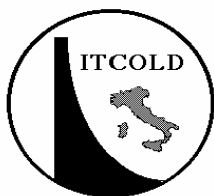
Il codice C/A è attualmente ottenuto dalla modulazione della sola portante L1: pur essendoci in commercio ricevitori in grado di ricevere il codice C/A anche dalla portante L2, non ci sono ancora satelliti attivi che trasmettono tale codice su quest'ultima portante.

Questo codice trasmette 1.023 Mbps e su di esso si basa la modalità del segnale denominata SPS (Standard Positioning Service). A partire dal 2 maggio 2002 è stata tolta la degradazione della piena capacità del codice C/A, detta Selective Availability (SA), che era ottenuta mediante l'introduzione di errori di orologio e di effemeridi nel codice D; pertanto è di fatto aumentata la capacità di precisione del SPS da 100 m agli attuali 5-10 m.

Il codice D, detto anche segnale telemetrico, contiene una grande quantità di informazioni di cui le più importanti sono: le correzioni di orologio tra l'orologio dei satelliti e il tempo GPS delle stazioni di controllo (più precise nel caso di PPS rispetto a SPS), le effemeridi trasmesse (broadcast ephemeris), i termini di correzione dell'errore dovuto alla ionosfera, i coefficienti per convertire il tempo GPS in tempo assoluto (Universal Coordinated Time), i dati di almanacco e le notizie sullo stato di salute dei satelliti.

Le modulazioni delle portanti per ottenere i codici binari è ottenuta marcando ogni passaggio da +1 a 0 mediante uno sfasamento della portante di  $90^\circ$ , la quale rimane sfasata fino al nuovo passaggio da 0 a +1.





## **APPENDICE B    La correzione degli errori nel GPS Differenziale**

Va ricordato che gli errori casuali introdotti volutamente dal progetto GPS originale, che vanno sotto il nome di Selective Availability (SA, v. Appendice A), sono stati aboliti dall'amministrazione americana il 2 maggio 2000. Già questo intervento ha consentito di ridurre di un ordine di grandezza l'errore nella determinazione della posizione.

Lo sfasamento  $d\tau$  tra gli orologi del satellite e del ricevitore inficia il calcolo di  $\Delta t_i$  nell'equazione 2):

$$\Delta t_i \text{ misurato} = \Delta t_i \text{ vero} + d\tau$$

L'utilizzo del 4° satellite non solo risolve il problema dell'ambiguità della soluzione della posizione ottenuta con 3 satelliti, ma contribuisce come quarta equazione del sistema 1) a ricavare uno dei  $\Delta t_i$ . Utilizzando il valore così ottenuto come  $\Delta t_i$  vero si ricava una stima per  $d\tau$ .

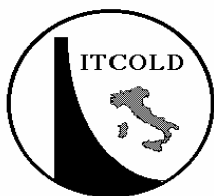
Il ricevitore fisso può iterare il procedimento per tutti i satelliti accessibili ed è quindi in grado di fornire al ricevitore mobile la correzione necessaria in tempo reale.

L'equazione 1), tenendo conto anche del percorso extra effettuato dal segnale nell'attraversamento dell'atmosfera, ora diventa

$$D_i = c \Delta t_i = \sqrt{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2 + (Z_p - Z_i)^2} + c \delta\tau_{iP} + \delta_{ionosf} + \delta_{troposf} \quad 1a)$$

Le correzioni per  $\delta_{ionosf}$  e  $\delta_{troposf}$  sono apportate sempre in tempo reale dal software del ricevitore fisso, in quanto i parametri necessari per calcolare le deviazioni indotte dalla ionosfera e dalla troposfera sono forniti dallo stesso segnale GPS sulla base di modelli matematici aggiornati dalle stazioni di controllo a terra.

La quantità  $\delta\tau_{iP}$  vuole ricordare, con il suo doppio pedice, che il suo valore dipende sia dagli errori di sincronizzazione dell'orologio a bordo del satellite  $i$ -esimo e sia da quelli dovuti all'orologio del ricevitore posto nel punto P.

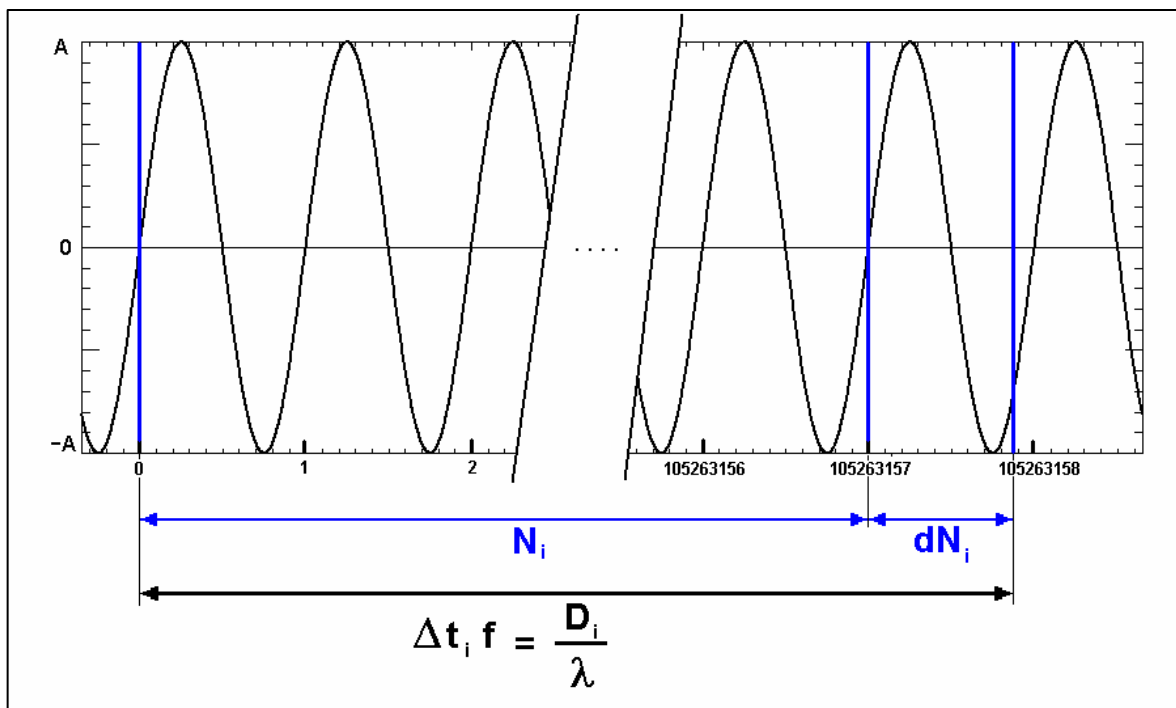


## APPENDICE C La correzione degli errori nelle misure di fase con il GPS

La portante L1 (v. nota <sup>7</sup>) può essere rappresentata analiticamente nella forma

$$P_{L1} = A \sin(\omega t + \varphi) \quad 3)$$

con A ampiezza,  
 $\omega$  pulsazione, pari a  $2\pi f$ ,  
 $f$  frequenza della portante, pari a 1575,42 Hz,  
 $t$  tempo,  
 $\varphi$  fase.



**Figura C1** – Rappresentazione dell'equazione 3). Per semplicità si è supposto che il segnale cominci ad essere trasmesso esattamente all'inizio di un ciclo. Nel tempo  $\Delta t_i$  si susseguono  $N_i$  cicli interi e una frazione di ciclo  $dN_i$  corrispondente a  $\varphi / 2\pi$ .

Ora, moltiplicando la 1a) per  $f / c = 1 / \lambda$ , essendo

c la velocità della luce  
 $\lambda$  la lunghezza d'onda della portante L1, pari a circa 19 cm

<sup>7</sup> Alcuni ricevitori che effettuano misure di questo tipo utilizzano anche la portante L2; questa però ha una frequenza leggermente inferiore rispetto a quella di L1, che resta pertanto preferibile.





si ottiene a primo membro la distanza del satellite i-esimo espressa in numero di lunghezze d'onda della portante :

$$\frac{f D_i}{c} = f \Delta t_i = \frac{D_i}{\lambda} = \frac{f}{c} \sqrt{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2 + (Z_p - Z_i)^2} + f \delta \tau_{ip} + \frac{f}{c} (\delta_{ionosf} + \delta_{troposf}) \quad 1b)$$

Tale numero ha una parte intera  $N_i$  e una parte decimale  $dN_i$ , corrispondente a una frazione di lunghezza d'onda e che coincide, a meno di  $2\pi$ , con la fase  $\varphi$  della 3) (v. Figura 1).

Si supponga che il ricevitore, ottenendo il  $\Delta t_i$  riesca a contare il numero dei periodi della portante che transitano in quello stesso arco di tempo. Otterrebbe proprio il valore  $N_i$ , oltre ad una frazione di periodo aggiuntiva  $dN_i$ . La 1b) si trasforma così in una relazione di fase:

$$dN_i = \frac{f}{c} \sqrt{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2 + (Z_p - Z_i)^2} + f \delta \tau_{ip} + \frac{f}{c} (\delta_{ionosf} + \delta_{troposf}) - N_i$$

Introducendo per una rappresentazione più sintetica la grandezza  $D_{pi}$  che rappresenta la distanza teorica effettiva tra il punto P e il satellite i-esimo

$$D_{pi} = \sqrt{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2 + (Z_p - Z_i)^2}$$

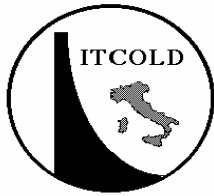
l'equazione 1b) si riduce a

$$dN_i = \frac{f}{c} D_{pi} + f \delta \tau_{ip} + \frac{f}{c} (\delta_{ionosf} + \delta_{troposf}) - N_i \quad 1c)$$

Se ora il segnale dello stesso satellite i-esimo fosse ricevuto da due ricevitori posti nei punti P1 e P2, non troppo distanti tra loro (entro circa una decina di Km, in modo da considerare il loro percorso identico ai fini degli errori di propagazione nell'atmosfera), e si effettuasse la differenza delle due fasi, si otterrebbe

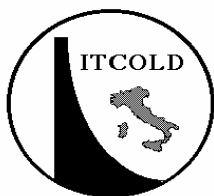
$$dN_{p1i} - dN_{p2i} = \Delta N_i = \frac{f}{c} (D_{p1i} - D_{p2i}) + f (\delta \tau_{p1} - \delta \tau_{p2}) - (N_{p2i} - N_{p1i}) \quad 1d)$$

Nella differenza i contributi indesiderati dovuti agli errori provenienti dall'orologio del satellite e dalla propagazione atmosferica vengono così rimossi. Restano gli errori dovuti all'orologio dei ricevitori e una quantità legata al numero intero di lunghezze d'onda che intercorrono tra il satellite i-esimo e i due ricevitori.



Questo risultato prende il nome di **misura delle differenze singole di fase** (l'aggettivo singolo si riferisce all'uso di un solo satellite alla volta) e deve essere calcolato per gli indici  $i$  che variano da 1 a 4 , ovvero effettuando 4 osservazioni utilizzando 4 satelliti diversi.

Passando a misure delle differenze **doppie** di fase, ciascuno dei due ricevitori si collega con due satelliti ottenendo 2 relazioni del tipo 1d), una con l'indice per il satellite  $i$  e un'altra con l'indice per il satellite  $j$ . Sottraendo fra loro queste due equazioni scompaiono i contributi indesiderati dovuti agli errori provenienti dagli orologi dei ricevitori. Rimangono ovviamente delle ambiguità relative ai numeri di cicli interi, ma prolungate acquisizioni consentono di ridurre l'entità dell'errore a frazioni di cm.



## **Bibliografia**

- [1] Kenneth, W. Hudnut and Jeffrey, A. Behr (1998). *Continuous GPS monitoring of Structural Deformation at Pacoima Dam, California* – Seismological Research Letters (Seismological Society of America) vol. 69, N.4; pp. 299-308.
- [2] Lutes, James, A (2002). *Automated Dam Displacement Monitoring Using A Robotic Total Station*. M.Sc.E. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 214, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 138 pp.
- [3] Hatjidakis, N. et al. (2006). *Statistical analysis and displacement determination using different GPS sessions. An application on dam of Thesarus* – 3° IAG/ 12° FIG Symposium, Baden, Maggio 22-24, 2006.
- [4a] A.Bassini, S.Musazzi, G.Savio, F.Novali, S.Cespa, U.Perini, G.Mazzà (2003). *Verifica delle prestazioni della tecnica INSAR basata sull'uso dei Permanent Scatterers mediante confronto con dati ottenuti utilizzando metodologie convenzionali (GPS)* – Rapporto CESI A3/023300, 46 pp.
- [4b] Enrico Rondena e Guido Mazzà (2003). *Ricognizione tecnico-scientifica sull'impiego di rilievi condotti con tecniche satellitari per il monitoraggio dei movimenti di versante dei bacini. Confronto con le tecniche tradizionali* – Rapporto CESI A3/005500, 37 pp.
- [5] Larson, M. Kristine and Levine, Judah (1999). *Carrier-Phase Time Transfer* – IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 46, N.4; pp 1001-1012.
- [6] Lima, Nuno et al. (2005). *Accuracy of Displacement Monitoring at Large Dams with GPS* . International Association of Geodesy Symposia - Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles - vol. 131; pp. 239-243.
- [7] ARPA - Regione Lombardia. *Monitoraggio – Linee guida per il controllo dei fenomeni franosi*.