



Marica Franzini

Laboratorio di Geomatica - DICAr

Università di Pavia

email: marica.franzini@unipv.it



Il segnale GPS

Premessa - 1

I segnali GPS giocano un ruolo chiave nell'architettura del sistema e sono costituiti da onde elettromagnetiche che si propagano dal satellite verso il ricevitore.

La propagazione di un segnale elettromagnetico viene descritta dalla Fisica per mezzo delle equazioni di Maxwell, in termini di variazioni nello spazio e nel tempo dei campi elettrico e magnetico.

Tali fenomeni sono estremamente complessi, tuttavia è possibile dare una descrizione semplificata ma molto rappresentativa, basata sulle onde piane.

Premessa - 2

Un'onda piana è un'onda a frequenza costante e la cui ampiezza picco-picco è anch'essa costante.

Un fenomeno sinusoidale che si ripete nel tempo con esatta ciclicità è descritto dalla seguente equazione:

$$A(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$$

dove A_0 è l'ampiezza del segnale, ω è la pulsazione e φ_0 è la fase iniziale.

Un'onda piana può pertanto essere descritta tramite pochi e semplici parametri.

Richiami

- ✓ Periodo T : tempo in cui viene emesso un ciclo completo $\rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega}$
- ✓ Frequenza f : numero di cicli completi emessi nell'unità di tempo $\rightarrow f = \frac{1}{T}$
- ✓ Lunghezza d'onda λ : distanza percorsa dall'onda nel tempo $T \rightarrow \lambda = T \cdot c$

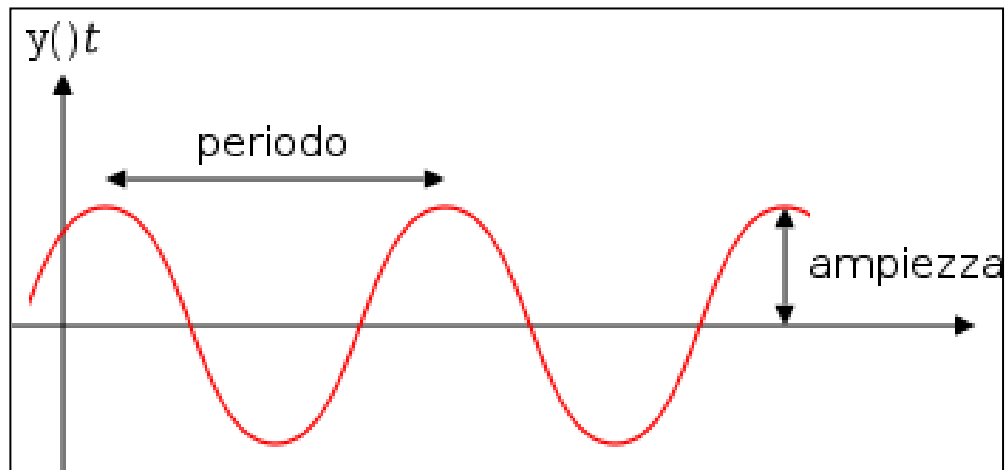


Grafico nel tempo

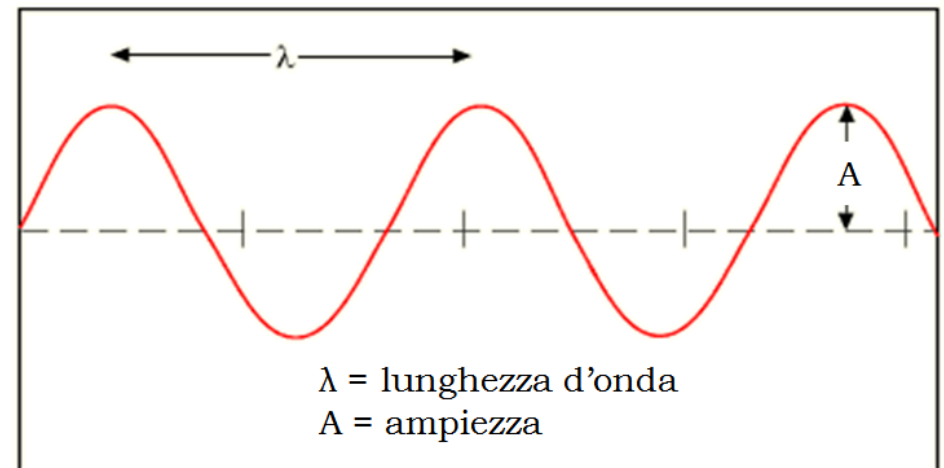


Grafico nello spazio

Trasmettere informazioni

Le onde piane sono il cardine delle tecniche di trasmissione del segnale poiché sono facili da generare e da ricevere.

Hanno però una bassa capacità di trasmettere informazioni: fissata l'ampiezza e la lunghezza d'onda si possono trasmettere al più due numeri (informazioni).

Ma se devo trasmettere informazioni, come ad esempio:

- ✓ un messaggio mail
 - ✓ un file
 - ✓ un'immagine
 - ✓ una registrazione audio
 - ✓ l'andamento in funzione del tempo di un qualsiasi fenomeno fisico
- ... devo modificare l'onda piana attraverso la modulazione del segnale.

Modulazione del segnale

NOMENCLATURA:

- ✓ modulazione - tecnica per cui un messaggio viene trasmesso tramite modifica di un onda piana
- ✓ portante - onda piana sfruttata
- ✓ segnale - risultato della modulazione

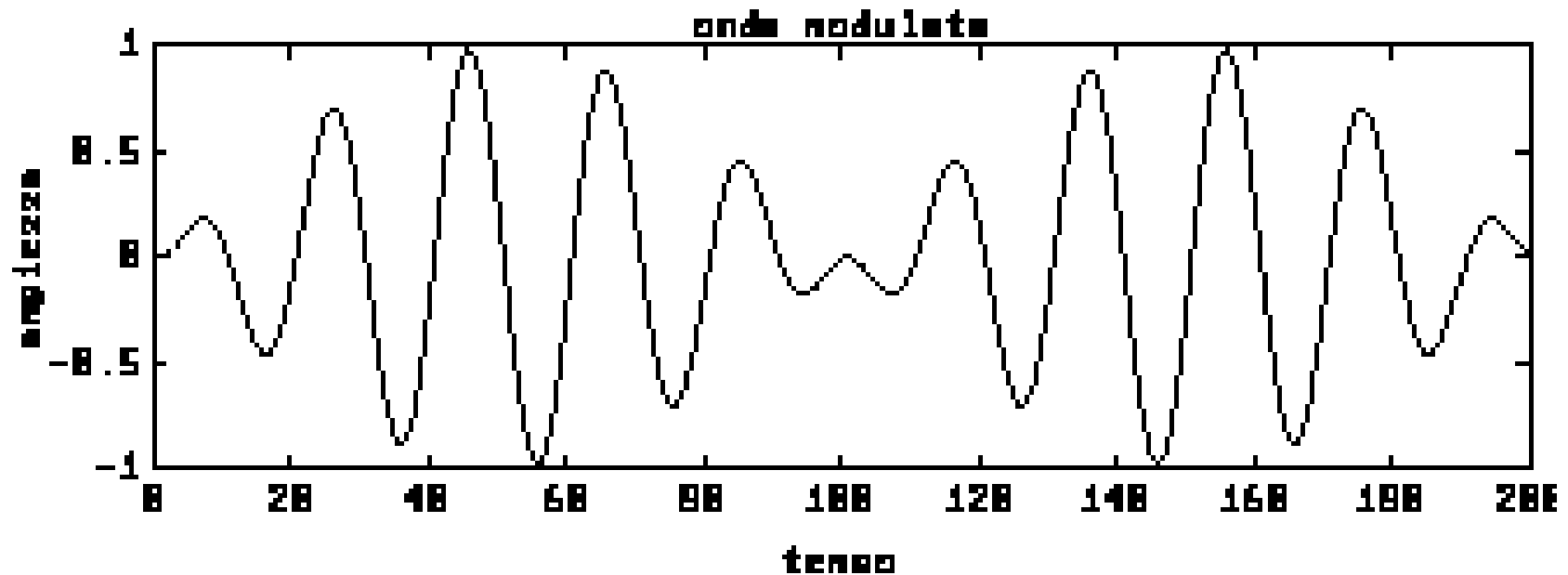
Esistono diverse tecniche per la modulazione del segnale.

Le principali sono:

1. modulazione d'ampiezza
2. modulazione di frequenza
3. modulazione di fase

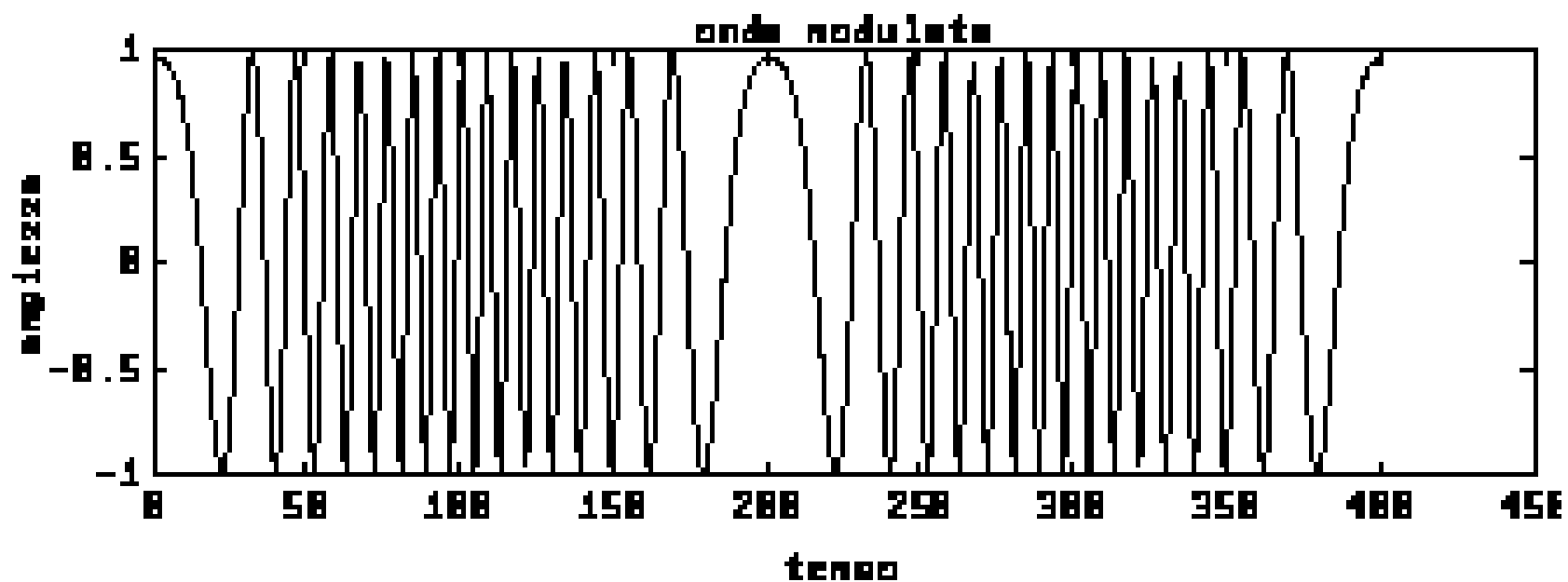
Modulazione di ampiezza

In questa tecnica di modulazione, l'ampiezza dell'onda piana varia in funzione del tempo.



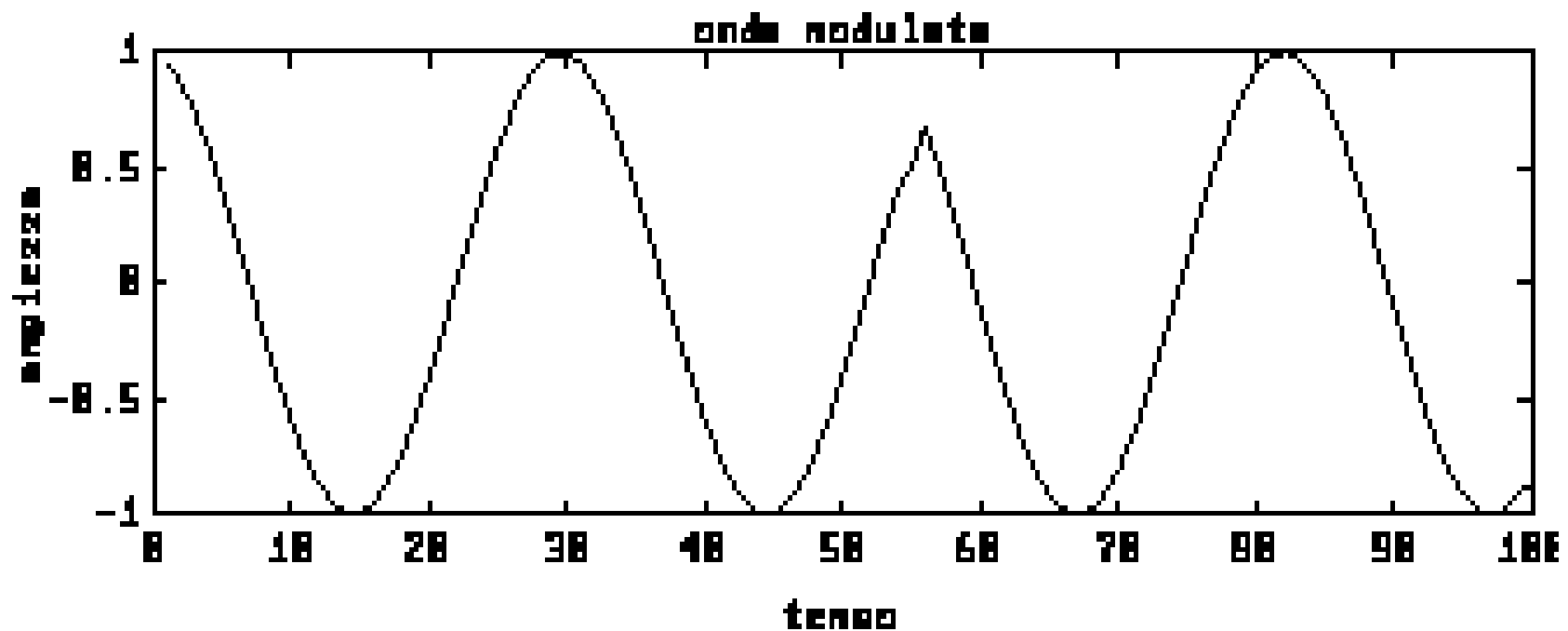
Modulazione di frequenza

In questa tecnica di modulazione, la frequenza dell'onda piana varia in funzione del tempo.



Modulazione di fase

In questa tecnica di modulazione, la fase dell'onda piana varia in funzione del tempo.

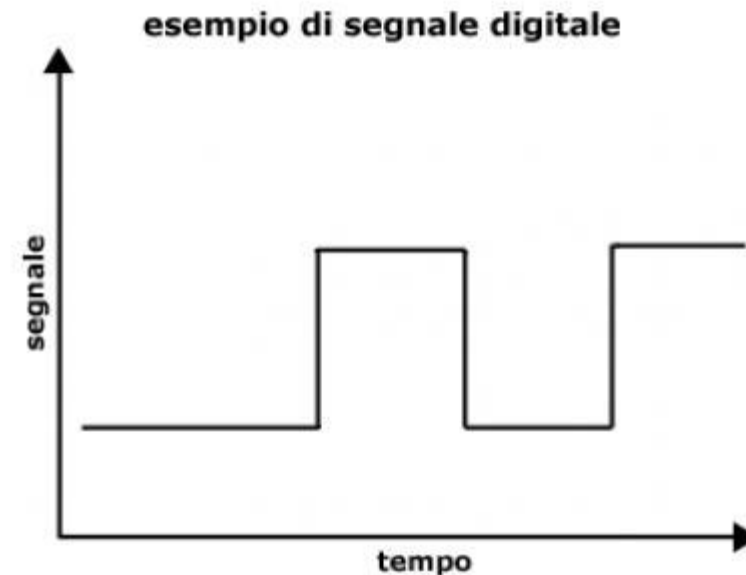
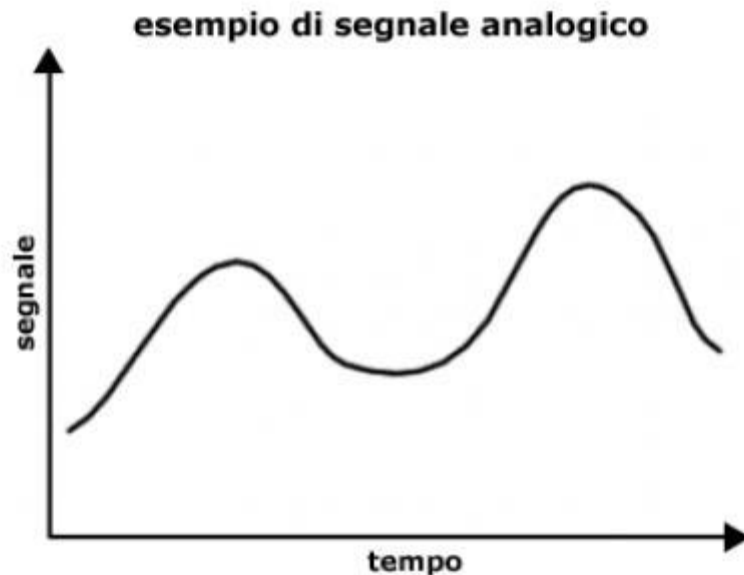


Segnali analogici e segnali digitali - 1

Il segnale, ossia il prodotto della modulazione, può essere di due tipi:

Segnale analogico - è un segnale continuo nel tempo che può assumere tutti gli infiniti valori della grandezza fisica osservabile, sia essa una tensione, una corrente, una temperatura o altro.

Segnale digitale - È un segnale che può assumere solo un numero discreto (numerabile) di valori. Ad esempio un'onda quadra che assume i valori logici 1 e 0.



Segnali analogici e segnali digitali - 2

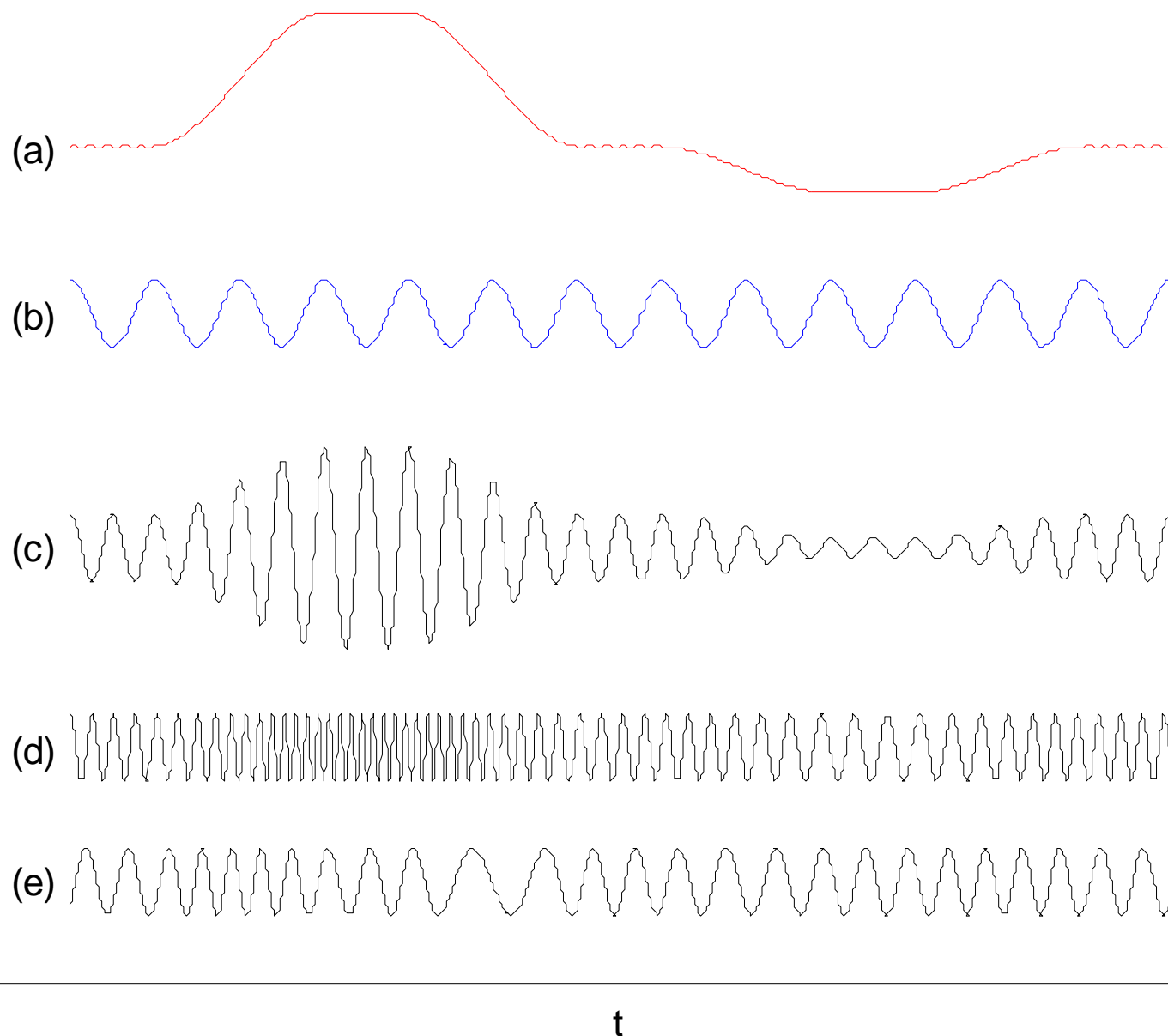
Segnali analogici (ad es. onda piana) - avevamo già visto i parametri principali per descrivere un onda piana

- ✓ periodo T : tempo in cui viene emesso un ciclo completo
- ✓ frequenza f : numero di cicli completi emessi nell'unità di tempo
- ✓ lunghezza d'onda λ : distanza percorsa dall'onda nel tempo T

E' possibile descrivere un segnale digitale utilizzando gli stessi parametri ed istituendo un'analogia:

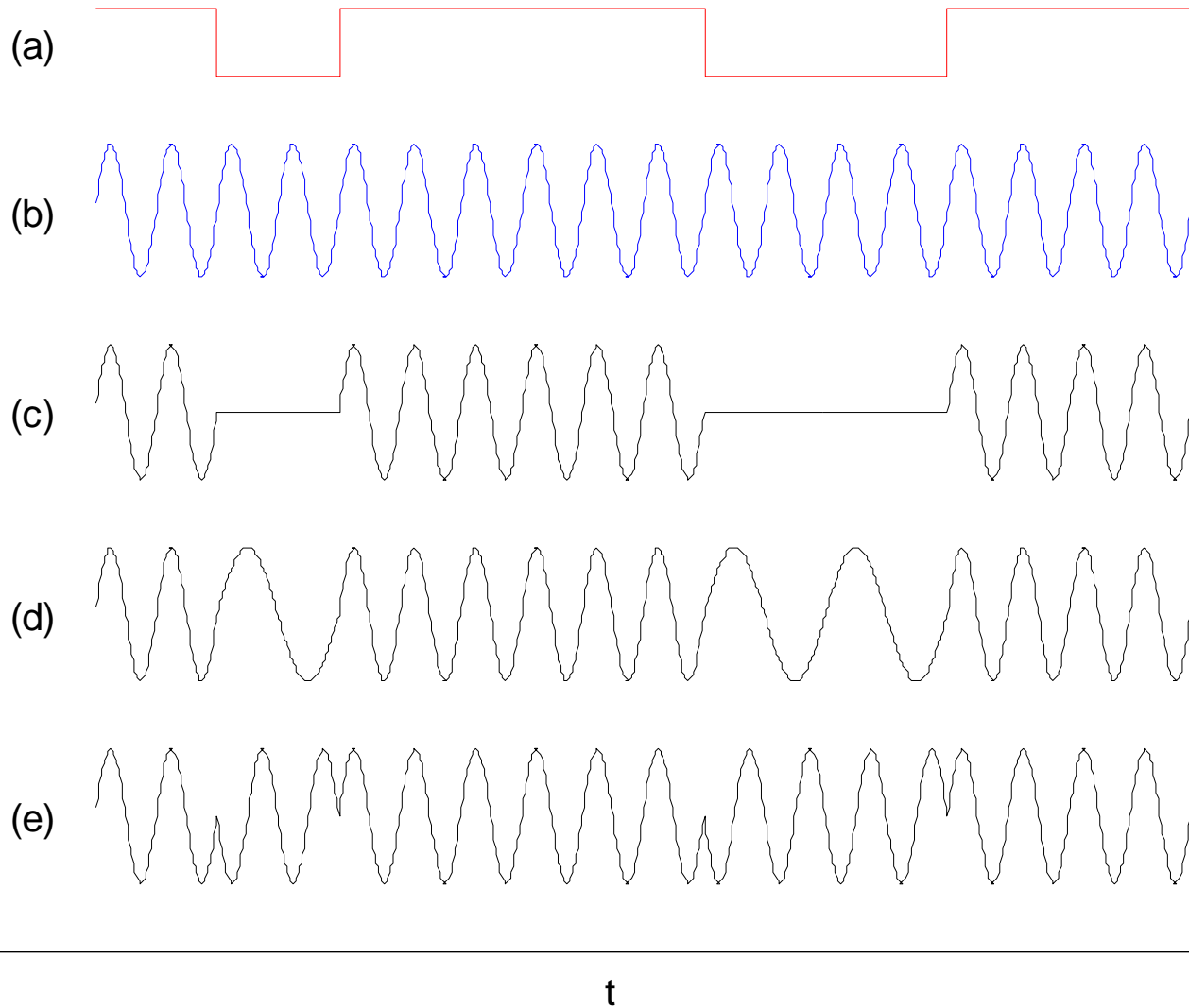
- ✓ periodo T^* : tempo in cui viene emesso un singolo bit
- ✓ frequenza f^* : numero di bit emessi nell'unità di tempo
- ✓ lunghezza d'onda (bit length) λ^* : distanza percorsa dal segnale nel tempo T^* ossia nell'arco di emissione di un singolo bit

Esempi di modulazione analogica



- a) Messaggio
- b) Portante
- c) Modulazione di ampiezza (AM)
- d) Modulazione di frequenza (FM)
- e) Modulazione di fase (PM)

Esempi di modulazione digitale



- a) Messaggio
- b) Portante
- c) Modulazione di ampiezza (AM)
- d) Modulazione di frequenza (FM)
- e) Modulazione di fase (PM)

La modulazione ed il GPS

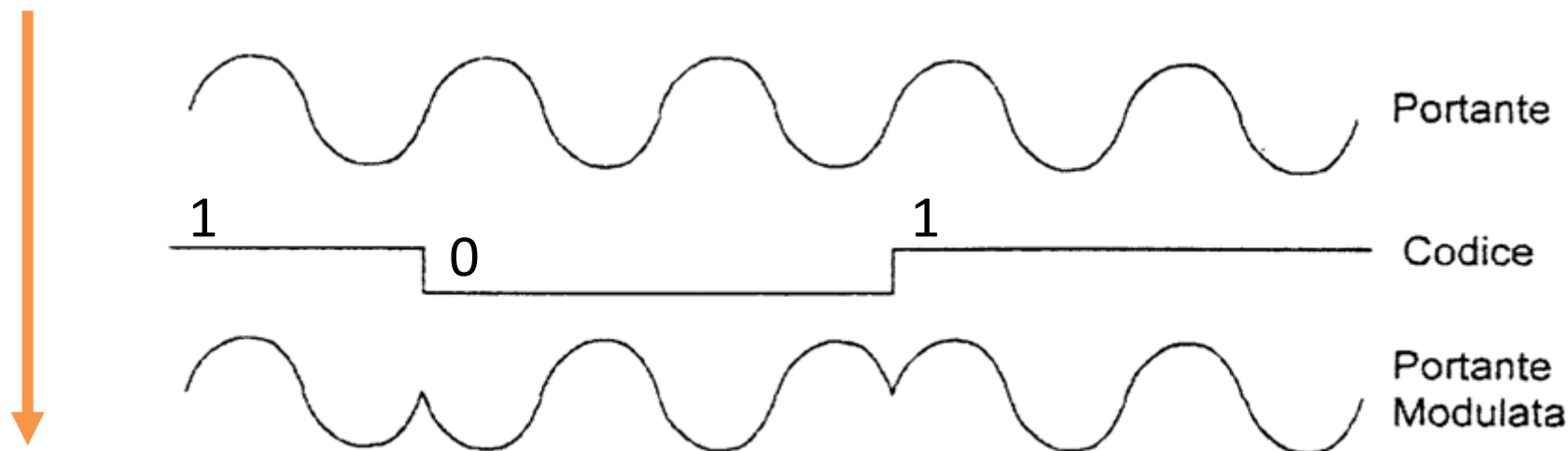
Le informazioni che i satelliti GPS inviano verso i ricevitori contengono una miriade di informazioni non descrivibili tramite un fenomeno continuo; è quindi necessario l'utilizzo di messaggi digitali - chiamati anche codici.

Abbiamo visto che esistono diverse tecniche per la modulazione di messaggi digitali su onde piane: modulazione d'ampiezza, di frequenza e di fase.

Il GPS utilizza la modulazione binaria di fase (BPSK – Binary Phase Shift Keying). Il termine aggiuntivo "binario" indica che il messaggio da inviare può assumere unicamente i valori 1 e 0; in altri termini viene trasmesso un codice binario.

BPSK - 1

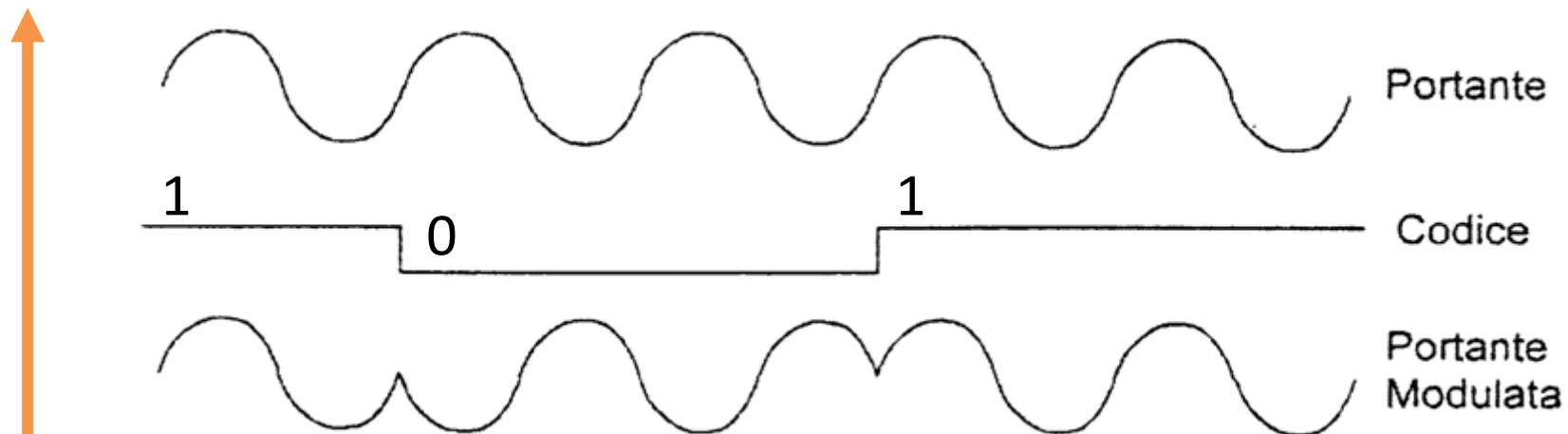
Nella BPSK ogni transizione del codice (passaggio da 0 a 1 o viceversa) provoca una variazione nella fase della portante di π .



NB - Insieme al metodo di modulazione deve esistere anche quello di demodulazione; il ricevente deve riuscire ad interpretare il segnale in modo da poter risalire al messaggio originario.

BPSK - 2

Per demodulare un segnale ottenuto con BPSK è sufficiente modularlo una seconda volta con lo stesso codice:



Modulando due volte la BPSK con lo stesso codice, il risultato è la portante pura o, in altri termini, la seconda modulazione elimina la prima.

BPSK - 3

Una caratteristica importante della BPSK è che può essere reiterata in modo da modulare più codici sulla stessa portante.

Nel caso di due codici:

1. si modula il primo codice;
2. si modula il secondo codice sul risultato della prima modulazione.

Queste due caratteristiche - la capacità di demodulazione e quella di modulare più codici sulla stessa portante - sono due caratteristiche fondamentali alla base del posizionamento GPS.

Il segnale GPS

Alcuni punti chiave:

- ✓ il GPS utilizza la BSPK per inviare messaggi;
- ✓ i satelliti generano onde piane e le modulano per inviare verso terra le informazioni necessarie ai ricevitori per il posizionamento;
- ✓ gli orologi atomici di bordo vengono sfruttati per generare onde piane di una prefissata frequenza.

Nel GPS esiste quindi una frequenza fondamentale pari a $f_0 = 10.23 \text{ Mhz}$

Le portanti - 1

Abbiamo detto che con il termine portante si indica l'onda piana utilizzata per modulare un segnale.

In realtà il GPS non utilizza un'unica onda piana ma due differenti onde ottenute a partire dalla frequenza fondamentale.

Da f_0 vengono generate due frequenze:

1. $f_1 = 154 \cdot f_0 = 1.575420 \text{ Ghz}$
2. $f_2 = 120 \cdot f_0 = 1.227600 \text{ Ghz}$

I satelliti emettono quindi un segnale complesso caratterizzato dalla presenza di due onde piane portanti dette L_1 e L_2 , aventi frequenze f_1 e f_2 .

Le portanti - 2

Alle frequenze f_1 e f_2 corrispondono le due lunghezze d'onda:

$$1. \quad \lambda_1 = \frac{c}{f_1} \cong 19 \text{ cm}$$

$$2. \quad \lambda_2 = \frac{c}{f_2} \cong 24 \text{ cm}$$

Su queste due portanti vengono modulati tre differenti codici binari:

- ✓ codice C/A
- ✓ codice P
- ✓ codice D

I codici C/A, P e D

I codici C/A e P sono sequenze pseudo-casuali di 0 ed 1 (quindi non contengono vere e proprie informazioni) la cui unica funzione è permettere di effettuare il posizionamento (vedremo più avanti come):

- ✓ C/A - coarse acquisition (acquisizione grezza)
- ✓ P - precision (precisione)

Perché due?

Hanno caratteristiche (frequenza e lunghezza d'onda) diverse e permettono di effettuare il posizionamento con diversi livelli di accuratezza: il codice C/A è accessibile a tutti mentre il codice P è accessibile ai soli utenti qualificati.

Il codice D è invece un codice binario che contiene tutte le informazioni alfanumeriche necessarie ai ricevitori per effettuare il posizionamento.

Il codice C/A - 1

Il codice C/A è disponibile per tutta l'utenza civile ed è caratterizzato da:

$$f_{C/A}^* = 1.023 \text{ Mbps} \quad \lambda_{C/A}^* = \frac{c}{f_{C/A}^*} \cong 293.05 \text{ m} \quad t_{C/A}^* = \frac{1}{f_{C/A}^*} \cong 1 \text{ ms}$$

Si ricorda che ne caso di segnali digitali, i numeri precedenti devono essere pensati come:

- ✓ frequenza - numero di bit trasmessi nell'unità di tempo - nel nostro caso vengono trasmessi 1023000 bit in un secondo
- ✓ lunghezza d'onda - distanza percorsa dal segnale durante l'emissione del singolo bit

Potrebbe essere utile considerare anche la *code length*, cioè la distanza coperta dal segnale nel tempo ($T_{C/A}^* = 1023 \cdot t_{C/A}^* \cong 1 \text{ ms}$) necessario per una ripetizione completa del codice C/A:

$$\Lambda_{C/A}^* \cong 1023 \cdot \lambda_{C/A}^* \cong 299.79 \text{ Km}$$

Il codice C/A - 2

Fissata la lunghezza del codice C/A, 1023 bit, ne esistono molti diversi; nel caso del GPS ne vengono utilizzati 36 diversi e ogni satellite ha un suo proprio codice C/A.

Il codice C/A ha le seguenti caratteristiche - utili ai fini del posizionamento:

1. codici C/A differenti hanno bassa correlazione tra loro - è facile e rapido per un ricevitore GPS determinare da quale satellite proviene il segnale captato;
2. i codici C/A hanno bassa correlazione con loro copie sfasate; questa particolarità è utile (come vedremo) per effettuare il posizionamento GPS.

Il codice P

Il codice P è il codice originariamente pensato per le applicazioni militari e può essere caratterizzato da:

- ✓ frequenza $f_P^* = 10.23 \text{ Mbps}$
- ✓ lunghezza d'onda $\lambda_P^* \cong 29.31 \text{ m}$
- ✓ periodo $t_{C/A}^* = \frac{1}{f_{C/A}^*} \cong 0.1 \text{ ms}$

Il tempo di ripetizione del codice P è di 37 settimane ed, ad ogni satellite, ne viene assegnato una porzione pari ad una settimana (si ripete ogni mezzanotte tra sabato e domenica).

Il codice P è noto e documentato, per cui è disponibile all'utenza civile, ma normalmente viene criptato con un codice riservato W (attivo dal 1994 con il termine *anti-spoofing*). Perché viene nascosto? Vedremo nella parte relativa agli errori che esso permette un posizionamento più accurato (da qui il nome).

Il codice D

Il codice D, o messaggio navigazionale, ha lo scopo di fornire ai ricevitori una lunga serie di informazioni necessarie per effettuare il posizionamento.

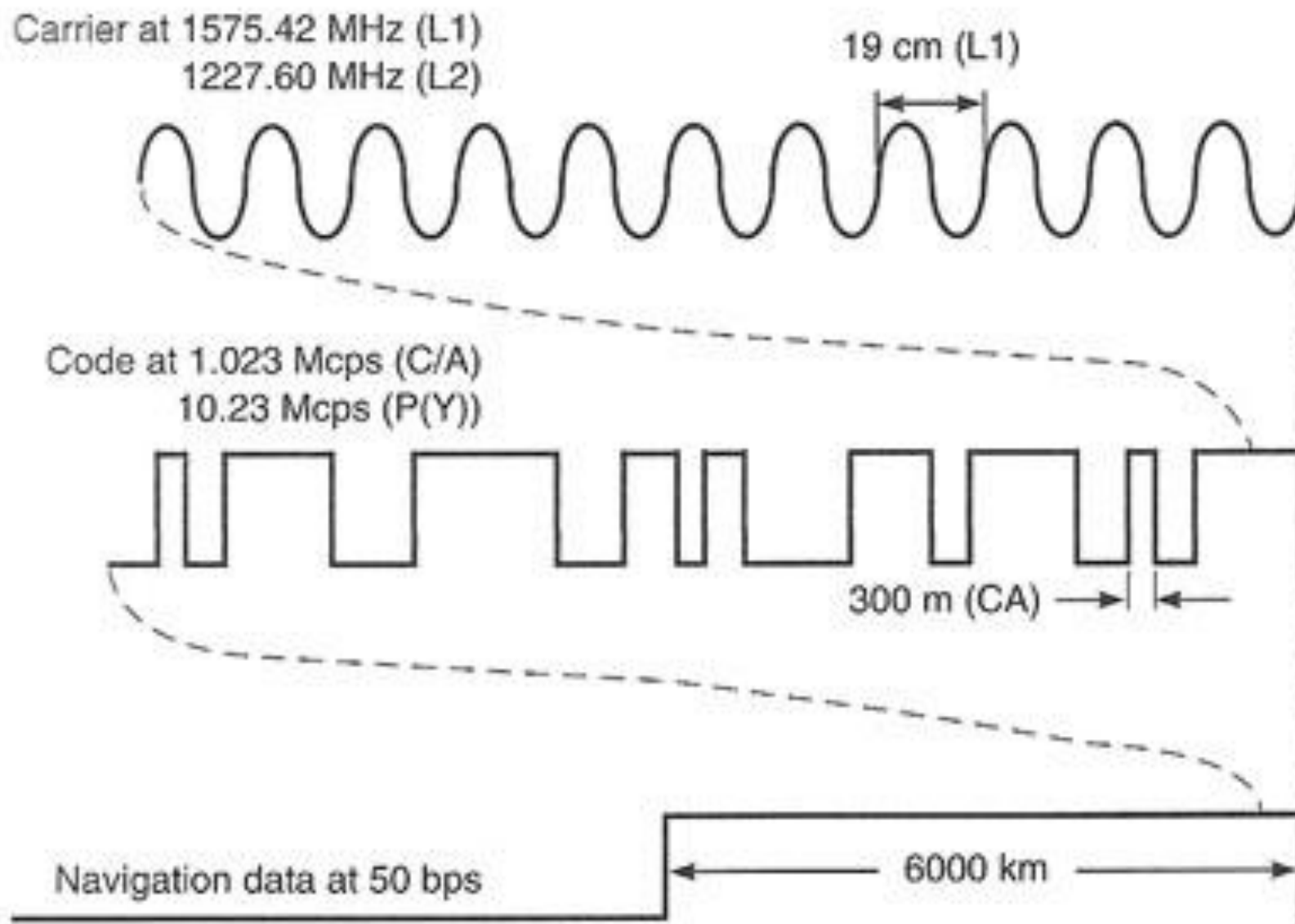
E' un codice a bassa frequenza:

- ✓ frequenza $f_D^* = 50 \text{ bps}$
- ✓ lunghezza d'onda $\lambda_p^* \cong 5996 \text{ Km}$

Le informazioni principali trasmesse sono:

- ✓ l'almanacco dei satelliti, cioè un modello semplificato che permette di prevedere la posizione approssimativa di tutti i satelliti (utile per il *planning*);
- ✓ informazioni sullo stato di salute;
- ✓ le effemeridi predette;
- ✓ una stima dello sfasamento degli orologi di bordo del satellite.

Ricapitolando



La struttura finale del segnale - 1

Il segnale emesso dai satelliti può essere scritto come:

$$S_1 = C/A(t) \otimes D(t) \otimes A_1 \cos(2\pi f_1 f + \varphi_1) + P(t) \otimes D(t) \otimes A_1 \sin(2\pi f_1 f + \varphi_1)$$

$$S_2 = P(t) \otimes D(t) \otimes A_2 \cos(2\pi f_2 f + \varphi_2)$$

dove il simbolo \otimes indica la modulazione binaria di fase.

Due segnali modulati su due portanti L_1 ed L_2 :

- ✓ sulla portante L_1 vengono modulati tutti e tre i codici (C/A, P e D)
- ✓ sulla portante L_2 vengono modulati due codici (P e D)

La struttura finale del segnale - 2

In realtà, poiché il codice P è criptato, quello che un ricevitore GPS capta è:

$$S_1 = C/A(t) \otimes D(t) \otimes A_1 \cos(2\pi f_1 f + \varphi_1) + Y(t) \otimes D(t) \otimes A_1 \sin(2\pi f_1 f + \varphi_1)$$

$$S_2 = Y(t) \otimes D(t) \otimes A_2 \cos(2\pi f_2 f + \varphi_2)$$

dove il Y compare al posto del codice P.

La struttura finale del segnale - 3

Perché il segnale è così complesso?

- ✓ deve permettere di inviare un elevato numero di informazioni;
- ✓ nato come sistema militare non permette una comunicazione “a due vie” che invece permetterebbe un’eventuale semplificazione del segnale. La presenza dei codici permette di effettuare posizionamento utilizzando solo le informazioni provenienti dai satelliti;
- ✓ la struttura del segnale – la presenza di due onde portanti – permette la modellazione di alcuni fenomeni legati all’attraversamento atmosferico (in particolare lo strato ionosferico) che sono causa della principale fonte di errore nel posizionamento.

Novità

Negli ultimi anni anche il segnale GPS ha previsto delle sostanziali novità: la presenza di due nuovi codici L1C, L2C ed M; la presenza di una nuova portante L_5 .

- ✓ il codice L1C sarà un nuovo segnale civile disponibile sulla portante L_1 a partire dal blocco III (lanci previsti a partire dal 2014)
- ✓ il codice L2C, disponibile sui satelliti del blocco IIR-M, è modulato per l'utenza civile sulla portante L_2 ed è caratterizzato da:

$$f_{L2C}^* = 0.5115 \text{ Mbps} \quad \lambda_{L2C}^* = \frac{c}{f_{L2C}^*} \cong 293.05 \text{ m} \quad t_{L2C}^* = \frac{1}{f_{L2C}^*} \cong 20 \text{ ms}$$

- ✓ il codice M sarà un nuovo segnale militare disponibile a partire dal blocco III
- ✓ la nuova portante L_5 disponibile a partire dal blocco IIF (per ora solo 3 in orbita) permetterà di migliorare la stima dei ritardi atmosferici e la soluzione delle ambiguità $f_5 = 1.176 \text{ Ghz}$

Riassumendo

- ✓ il codice C/A - previsto su un'unica portante, permette di effettuare posizionamento per l'utenza civile
- ✓ il codice P - creato per l'utenza militare e criptato per quella civile permette un posizionamento più raffinato grazie alle sue caratteristiche intrinseche (lunghezza d'onda) e per la sua presenza su entrambe le portanti
- ✓ il codice L2C - la rinascita di Glonass e l'avvento di Galileo hanno stimolato la crescita di nuove applicazioni civili; per non essere inadeguato rispetto alle richieste di accuratezza, il GPS si è dotato di un codice civile anche sulla seconda frequenza. Attualmente è disponibile solo sui 7 satelliti del blocco IIR-M in orbita
- ✓ il codice M - nuovo codice per le applicazioni strategiche dell'esercito statunitense. Sfrutteranno la presenza di un'antenna direzionale dedicata (dal blocco III) per migliorare ulteriormente il posizionamento su zone di interesse strategico.