

Accuratezza e generatori di clock

L'accuratezza di un clock digitale è un parametro di particolare importanza nei sistemi di comunicazione dove coesistono differenti tecnologie che richiedono diversi livelli di accuratezza delle sorgenti di temporizzazione

Kris Young
Cypress Semiconductor

Una delle specifiche più importanti per valutare le prestazioni di un clock digitale è l'accuratezza, di solito specificata in termini di PPM (parti per milione). Tale parametro assume una particolare importanza nei sistemi di comunicazione dove coesistono differenti tecnologie che richiedono diversi livelli di accuratezza per le loro sorgenti di clock. L'accuratezza che un sistema di clock è in grado di garantire non dipende solamente dalle caratteristiche del quarzo, ma anche dalla configu-

razione e dalla tecnologia del generatore di clock con PLL digitali impiegato per generare le frequenze a partire da una sorgente di riferimento. Sono disponibili numerose tecnologie di generazione del clock che offrono differenti livelli di accuratezza per soddisfare i requisiti di qualsiasi applicazione. L'impiego efficiente di queste tecnologie può garantire un elevato livello di accuratezza, così come una riduzione del numero di quarzi caratterizzati da elevati livelli di accuratezza e precisione richiesti.

Accuratezza e precisione

L'accuratezza del clock dà un'indicazione di quanto una frequenza di clock si avvicina a una frequenza di clock ideale. Si tratta di un concetto differente da quello di precisione: quest'ultimo infatti si riferisce al fatto che una frequenza non vari da unità a unità, nel corso degli anni e sull'intervallo di temperatura di funzionamento. Si tratta di concetti indipendenti, come efficacemente raffigurato in figura 1. La distanza tra la media delle posizioni delle frecce e il centro del

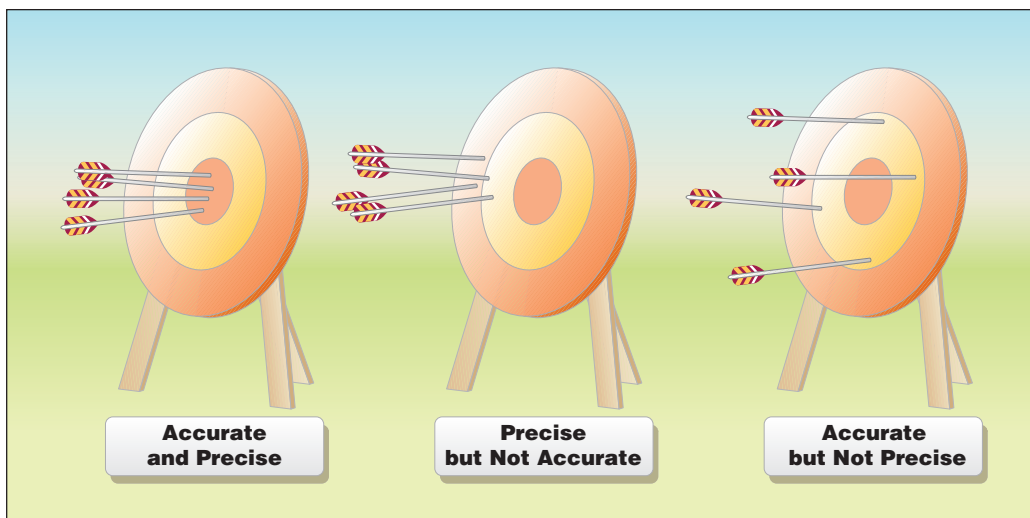


Fig. 1 - Accuratezza e precisione sono due concetti differenti

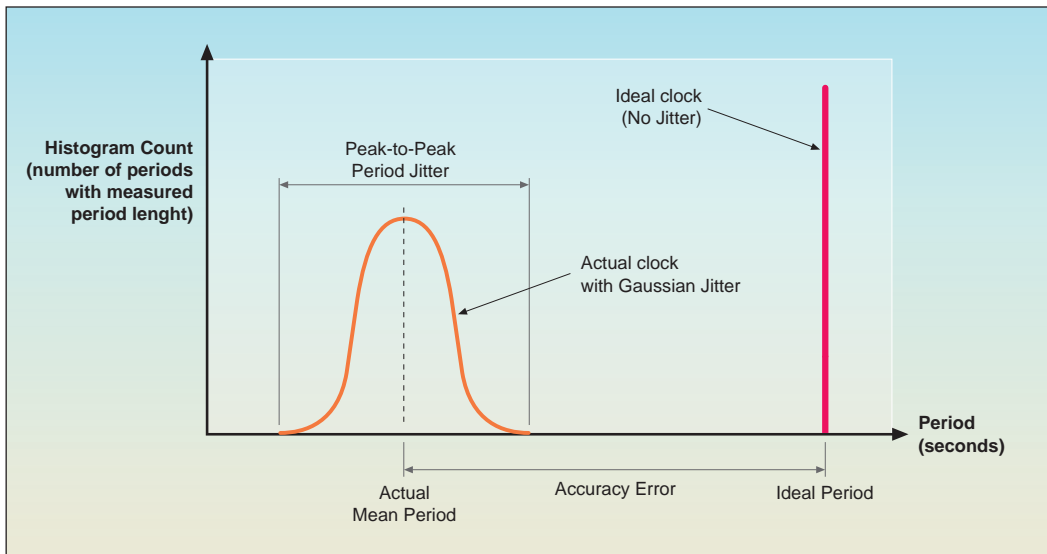


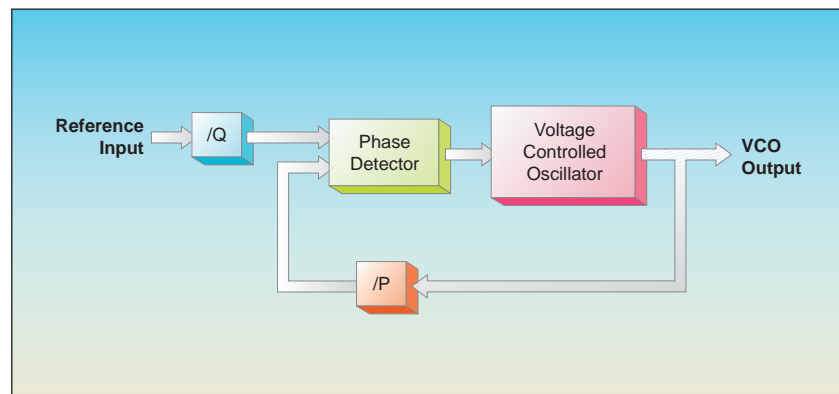
Fig. 2 - In questo istogramma viene evidenziata la relazione che intercorre tra jitter e accuratezza

Fig. 3 - Schema a blocchi semplificato di un generatore di clock con PLL digitale

bersaglio è una misura dell'accuratezza, mentre la distanza media tra le frecce è una misura della precisione. Se lo scopo finale è centrare il bersaglio, è chiaro che sono necessarie doti di precisione e di accuratezza.

Mentre per definire la precisione è necessario procedere alla misura di più unità, l'accuratezza richiede una sola misura. Per tale motivo quest'ultimo parametro può essere utilizzato per stabilire criteri di accettazione (pass/fail). Per misurare accuratezza e precisione si utilizzano rispettivamente la percentuale e le parti per milione (PPM). Quest'ultima unità è del tutto simile alla percentuale, solo che è 10.000 volte più piccola: mentre la percentuale è una parte su 100, il PPM è una parte su 1 milione.

L'accuratezza è un parametro di vitale importanza nelle comunicazioni seriali in quanto un determinato sistema si aspetta un flusso di dati in ingresso all'interno di un certo intervallo di velocità. Se la temporizzazione dei bit è al di fuori di questo intervallo, i circuiti di ricezione possono non essere in grado di agganciare il flusso di ingresso, fattore questo che può portare a errori di comunicazione. L'accuratezza risulta anche necessaria per la gestione del flusso e del buffering dei dati. Se questi ultimi arrivano a una velocità superiore



a quella prevista, devono essere memorizzati temporaneamente. Nel caso il flusso dei dati sia costante e la velocità resti superiore a quella prevista, i buffer possono riempirsi, provocando una situazione di overrun (sovraccarico) nel buffer e conseguente perdita di dati. Il ricevitore deve dunque procedere a una compensazione attraverso il controllo del flusso (segnalando al trasmettitore di ridurre la velocità) oppure sfruttando ogni spazio vuoto presente nel flusso dei dati (come ad esempio la spaziatura tra i pacchetti prevista dallo standard Ethernet).

Nel caso in cui la velocità di ingresso sia inferiore al previsto e il flusso di dati resta costante, si verifica una condizione di underrun (svuotamento) del buffer, responsabile di interruzioni nel flusso dei dati che possono provocare pro-

blemi in applicazioni quali lo streaming di segnali audio e video.

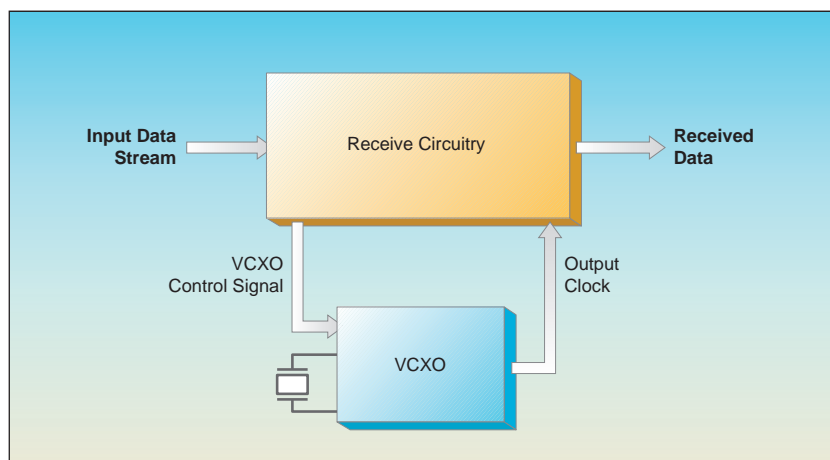
Nelle diverse tecnologie di comunicazione, come visibile in figura 1, vengono specificati i limiti di accuratezza relativi alla velocità di trasmissione nel caso peggiore (worst case): tali limiti si riferiscono alle velocità di segnalamento del livello fisico.

Accuratezza e jitter

Questi due termini sono spesso confusi l'uno con l'altro, sebbene si tratti di caratteristiche ben distinte di un sistema di temporizzazione.

Il jitter è relativo alla differenza tra il periodo medio di un clock e i singoli periodi di clock misurati da quel clock. Sebbene ogni singolo periodo può variare a causa del jitter, un clock che presenta fenomeni di jitter tenderà ad assu-

Fig. 4 - Schema a blocchi di un sistema di comunicazione basato su VCXO



mere il valore del suo periodo medio. Se si prende ad esempio il bersaglio di figura 1, il periodo medio è assimilabile al valor medio delle posizioni della freccia. Il periodo medio è il parametro utilizzato per il confronto con il periodo del sistema ideale al fine di misurare l'accuratezza.

Di conseguenza il calcolo dell'accuratezza può essere effettuato indipendentemente da qualsiasi analisi di jitter. Nell'istogramma di figura 2 viene evidenziato il metodo utilizzato per valutare l'accuratezza relativamente a un clock con un jitter caratterizzato da una distribuzione gaussiana casuale.

Caratteristiche del quarzo

Le caratteristiche del quarzo influenzano sia l'accuratezza sia la precisione. Tolleranza, invecchiamento e temperatura sono i tre parametri che influiscono sull'accuratezza e sulla precisione. La tolleranza è una misura della massima differenza tra le frequenze ideali del quarzo e le frequenze effettive che si riscontrano nei lotti di produzione. Con il trascorrere del tempo, la frequenza di un quarzo può subire fenomeni di deriva a parità di altre condizioni: tale fenomeno viene definito invecchiamento.

La frequenza di un cristallo, infine, può anche subire variazioni in funzione delle temperature. Tutti i fattori cui si è appena accennato danno un'idea di quanto la

frequenza di un singolo quarzo si discosti dal suo valore ideale o da quello degli altri cristalli.

Accuratezza e generatori di clock

I generatori di clock con PLL digitali rappresentano una soluzione efficace per generare segnali di clock a partire da un cristallo di riferimento. Tali dispositivi possono dar vita a differenti frequenze di clock a partire da un singolo quarzo come pure generare una frequenza non standard a partire da un cristallo standard. In ogni caso questi dispositivi seguono il riferimento di ingresso sfruttando un anello di retroazione chiuso e alcuni divisori come visibile in figura 3. La frequenza dell'ingresso di riferimento viene divisa per un numero (Q) dando origine a un segnale che viene confrontato con l'uscita di un oscillatore controllato in tensione (VCO - Voltage Controlled Oscillator) divisa per un numero P. P e Q vengono definiti in modo che il rivelatore di fase possa "vedere" la stessa frequenza da entrambi i divisori ($FRIF/Q = FVCO/P$). Il rivelatore di fase regola la tensione di ingresso del VCO finché non viene stabilita la corrispondenza di fase e frequenza delle uscite del divisore e opera in modo da mantenere tale corrispondenza.

Poiché l'uscita del VCO segue l'ingresso di riferimento, la precisione dell'usc-

ta sarà uguale a quella dell'ingresso di riferimento. Quindi se l'ingresso di riferimento subisce fenomeni di deriva in funzione della temperatura o del tempo, l'uscita del generatore di clock ne sarà influenzata allo stesso modo. Tale comportamento ha un indubbio vantaggio: se in un progetto viene utilizzato un riferimento estremamente preciso come ingresso di un generatore di clock, tutte le altre uscite del generatore di clock saranno caratterizzate dalla medesima precisione del riferimento senza che si abbiano costi aggiuntivi. Il generatore di clock può tuttavia aggiungere un errore di accuratezza fisso, che dipende dall'ampiezza digitale dei contatori P e Q e dalla relazione che intercorre tra la frequenza dell'ingresso di riferimento e la frequenza del VCO. Per la maggior parte del tempo i generatori di clock possono generare un'uscita con errore di accuratezza nullo, anche se alcune volte tale parametro assume un valore diverso da zero.

N frazionario

Grazie a una particolare tecnologia, denominata N frazionario, è possibile migliorare ulteriormente il livello di accuratezza. Si supponga che una delle soluzioni adottate per il calcolo di P ed N abbia portato a un errore di frequenza in direzione sia negativa (- 65 PPM) sia positiva (+4 PPM). Se si procede a una variazione dinamica dei valori di P e

TABELLA 1 - CARATTERISTICHE DI ACCURATEZZA DI ALCUNE TRA LE PIÙ DIFFUSE TECNOLOGIE DI COMUNICAZIONE

Tecnologia	Velocità trasferimento dati	Requisiti di accuratezza (±)
10/100 Ethernet	10/100 Mbps	100 PPM
Gigabit Ethernet (fibra-802.3z)	1,25 Gbps	100 PPM
Gigabit Ethernet (rame, 802.3a)	125 Mbaud	100 PPM
Host e hub USB (tutte le velocità)	480, 12, 1,5 Mbps	500 PPM
Periferiche USB high speed	480 Mbps	500 PPM
Periferiche USB full speed	12 Mbps	2500 PPM
Periferiche USB low speed	1,5 Mbps	15.000 PPM (1,5%)
Fibre Channel 1 G	1,063 Gbps	100 PPM
SONET strato 1	N/D	0,00001 PPM
SONET strato 3	N/D	4,6 PPM
MPEG (DVB-ASI)	270 Mbps	100 PPM
UART asincrono (porta seriale)	300 bps - 115,2 kbps	Nessun requisito, anche se è raccomandato il 2,5% per assicurare l'affidabilità della ricezione

Q, è possibile dar vita a valori P ed N frazionari, in modo da aumentare il livello di accuratezza. Le variazioni devono essere effettuate in maniera rapida in modo che il filtro d'anello del PLL possa fare la media delle due frequenze di uscita. È possibile trovare un duty cycle in modo da poter utilizzare la configurazione a - 65 PPM per una certa percentuale del tempo totale e la configurazione a + 4 PPM per il tempo rimanente, in modo che la media si approssimi a 0 PPM.

Dal punto di vista matematico, ciò si esprime con la seguente relazione:

$$f(4) + (1 - f)(-65) = 0; f = 0.942$$

Utilizzando i valori a + 4 PPM per il 94% del tempo e i valori a - 65 PPM per il restante 6%, l'errore di accuratezza risulta pari a solo - 0,14 PPM. L'errore di accuratezza può essere ulteriormente ridotto aumentando la risoluzione del duty cycle.

Oscillatore a quarzo controllato in tensione

Un'altra tecnologia utilizzata per determinare l'accuratezza del clock nei sistemi di comunicazione prevede l'uso di un VCXO (oscillatore a quarzo controllato in tensione). Questo metodo preve-

de una variazione della frequenza di oscillazione di un quarzo di poche centinaia di PPM in entrambe le direzioni mediante la modifica della capacità del circuito dell'oscillatore a quarzo. Questa variazione viene di solito effettuata mediante una tensione di controllo analogica, anche se può essere eseguita per via digitale sfruttando un'interfaccia seriale con alcuni generatori di clock. In un sistema di clock basato su VCXO, il sistema che riceve i dati realizza esternamente un anello di controllo per rilevare una differenza di frequenza e/o fase tra il clock ricevuto e il clock locale e si preoccupa di regolare il clock locale mediante il VCXO finché non si verifica la corrispondenza tra accuratezza e fasi. Benché ciò comporti un aggravio, in termini di complessità, del sistema, è necessario il ricorso a tale soluzione in tutte quelle applicazioni dove accuratezza e precisione risultano particolarmente critici.

Poiché un VCXO può seguire un flusso di dati senza dar adito a errori in termini di accuratezza, l'impiego di un tale dispositivo evita il verificarsi di situazioni di overrun e underrun del buffer, con tutti i vantaggi che ciò comporta. Nella figura 4 viene riportato lo schema di collegamento di un VCXO in un sistema di comunicazione.

Poiché il clock di uscita dell'oscillatore è agganciata al clock remoto utilizzato per generare i dati trasmessi, questo clock di uscita avrà le medesime caratteristiche in termini di accuratezza e precisione del clock remoto. Il generatore di clock basato su VCXO può contenere PLL digitali che possono essere a loro volta impiegati per generare altre frequenze indipendenti utilizzando la frequenza del quarzo sincronizzato come riferimento. Di conseguenza tutti i clock presenti sulla scheda possono essere generati in modo da eguagliare le caratteristiche di tolleranza, temperatura e invecchiamento del trasmettitore remoto. Nelle applicazioni di broadcasting (che utilizzano cavi, radio o satellite) dove è presente un numero nettamente superiore di ricevitori rispetto a quello dei trasmettitori, è possibile utilizzare un quarzo estremamente preciso e accurato (quindi costoso) per il trasmettitore. In questo modo tutti i ricevitori hanno a disposizione una sorgente di clock caratterizzata da livelli di precisione e accuratezza tipici di quello del clock del ricevitore utilizzando solamente un quarzo economico come riferimento sul lato ricezione. 

Cypress Semiconductor
 readerservice.it n. 30