

L'evoluzione della progettazione di sistemi analogici

I condensatori a capacità commutate permettono di creare blocchi programmabili da utilizzare nella progettazione di circuiti a segnali misti

Sachin Gupta
Senior applications engineer
Cypress Semiconductor

Il progetto di un sistema fisico richiede funzionalità di tipo sia analogico sia digitale. La capacità di realizzare un progetto di natura modulare e programmabile in questo ambito è un elemento di fondamentale importanza per le future applicazioni. Ciò ha portato a una diffusione sempre più ampia di progetti che utilizzano architetture a segnali misti (mixed signal). Scalabilità ed evoluzione delle esigenze degli utilizzatori sono due dei principali problemi che i progettisti devono affrontare quando realizzano un sistema impiegando componenti con funzioni fisse. Un progetto di natura modulare e programmabile permette di superare le problematiche legate al trasferimento, in uno stadio successivo, del progetto su componenti differenti. Una soluzione di natura programmabile è dunque sempre preferibile rispetto a una realizzazione che prevede funzioni fisse. Ciò ha sempre rappresentato un problema nel dominio analogico e l'utilizzo di circuiti a capacità commutate ha rappresentato un valido ausilio per la sua soluzione. I blocchi a capacità commutate sono i componenti fondamentali di una soluzione analogica programmabile.

I circuiti a capacità commutate consentono l'integrazione di funzioni analogiche e digitali all'interno di un unico chip che si può definire quindi un vero e proprio SoC (System-on-Chip). I tradizionali circuiti per l'elaborazione del segnale analogico utilizzano circuito a tempo continuo formati da resistori, condensatori e amplificatori operazionali. I circuiti analogici a tempo continuo utilizzano il rapporto delle resistenze, o l'ampiezza della resistenza o i valori di resistenza e capacità per impostare la funzione di trasferimento. È vero che la precisione assoluta di resistenze e condensatori realizzati in tecnologia MOS non è sufficiente per effettuare funzioni di elaborazione del segnale analogico. Ma, relativamente parlando, la precisione di un condensatore in

tecnologia MOS risulta accettabile. Oltre a ciò, la realizzazione di piccoli condensatori caratterizzati da un buon livello di precisione è abbastanza semplice e l'occupazione di spazio è inferiore rispetto a quello richiesto dalle resistenze. Queste le ragioni per cui si preferisce l'uso di circuiti a capacità commutate al posto dei tradizionali circuiti a tempo continuo.

Principio di funzionamento

L'utilizzo di un condensatore per emulare una resistenza si ritrova per la prima volta in un testo di Clerk Maxwell nel 1873: l'autore aveva misurato la resistenza del galvanometro collegando quest'ultimo in serie con una batteria, un amperometro e un condensatore e invertendo il condensatore su base periodica. Un approccio analogo viene utilizzato nei circuiti a capacità commutate. Questi circuiti utilizzano i condensatori per

emulare la resistenza per mezzo di un flusso di carica controllato in ingresso e in uscita utilizzano commutatori MOS: il flusso di carica controllato definisce la corrente e quindi la resistenza. Nelle figure 1a e 1b viene schematizzato il movimento della carica attraverso un resistore e un condensatore a capacità commutate. La corrente attraverso la resistenza di figura 1a è data ovviamente dall'equazione:

$$i = V/R \quad (\text{eq. 1})$$

Osservando la figura 1b, Φ_1 e Φ_2 sono clock che non si sovrappongono. Quando Φ_1 è chiuso e Φ_2 è aperto, il condensatore si carica alla tensione V . Di conseguenza la carica immagazzinata nel condensatore è data dalla seguente equazione:

$$q = CV \quad (\text{eq. 2})$$

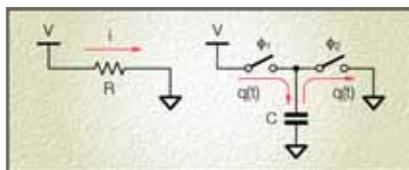


Fig. 1 – Movimento della carica attraverso un resistore a) e un condensatore a capacità commutate b)

Quando Φ_1 è aperto e Φ_2 è chiuso, la carica immagazzinata nel condensatore si trasferisce verso massa. In corrispondenza di ogni coppia sequenziale di chiusure commutate, viene trasferito un quanto di carica (quantum charge). Se la frequenza di commutazione dei commutatori è data da f_s , la corrente che fluisce attraverso il circuito può essere espressa dalla seguente equazione:

$$i = q/t = q f_s = f_s CV \quad (\text{eq. 3})$$

Dal confronto tra le equazioni 1) e 3) si evince che:

$$R = 1 / f_s C \quad (\text{eq. 4})$$

Il fattore principale da tenere in considerazione è che la resistenza equivalente è inversamente proporzionale al valore della capacità e della frequenza di commutazione. Ciò significa che il valore della resistenza può essere modificato variando il valore della capacità oppure della frequenza di commutazione. In ogni sistema dove sono disponibili risorse digitali, è molto semplice variare la frequenza di commutazione e quindi la resistenza.

Capacità commutate nell'architettura PSoC

I dispositivi PSoC (Programmable Systems-on-Chip) di Cypress Semiconductor utilizzano circuiti a capacità commutate per ottenere funzioni analogiche programmabili. Nei dispositivi PSoC i blocchi analogici a capacità commutate sono realizzati a partire da amplificatori operazionali caratterizzati da bassi valori di offset e rumore con ingresso e uscita rail-to-rail. La maggior parte dei circuiti analogici è composta

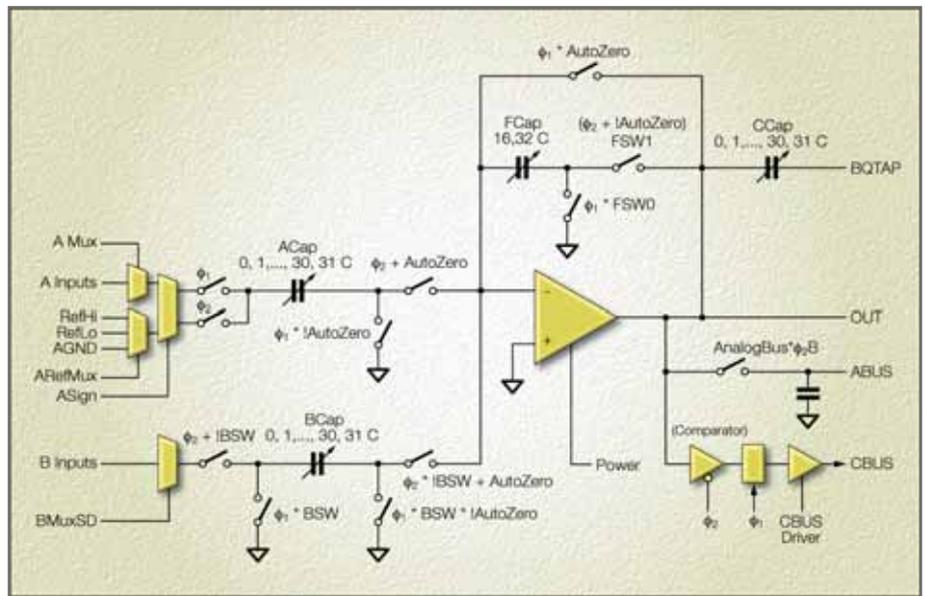


Fig. 2 – Schema a blocchi di un circuito a capacità commutate di un dispositivo PSoC

da condensatori e resistenze posti in ingresso e nel percorso di retroazione. Se risulta possibile programmare il valore di questi componenti e la loro modalità di connessione con l'amplificatore operazionale, essi possono comportarsi come amplificatore invertente, non invertente, filtro, integratore e così via.

Nella figura 2 viene riportato lo schema a blocchi di un generico circuito a capacità commutate integrato in un dispositivo PSoC.

In questo blocco è presente un insieme di condensatori a capacità commutate con ingressi binari pesati e l'utente ha la possibilità di programmare i vari pesi. Dallo schema di figura si può vedere che il commutatore BSW consente a BCap di funzionare come un condensatore o un condensatore a capacità commutate. Un condensatore a capacità commutate BCap programmabile si collega al nodo sommatore dell'amplificatore operazionale. Sempre facendo riferimento alla figura 2, il commutatore AnalogBus collega l'uscita dell'amplificatore operazionale a un buffer analogico. Un commutatore CompBus collega il comparatore ai blocchi digitali. I moltiplicatori presenti in ingresso consentono di effettuare la selezione tra le diverse sorgenti che possono essere ingressi esterni, uscite di qualche altro blocco analogico o riferimenti interni. Sono presenti parecchi registri per il controllo della configurazione. Poiché tutto è controllato mediante i bit dei registri, le funzionalità possono essere modificate anche durante il funzionamento. In questo modo, alcuni blocchi possono comportarsi in maniera differente in base alle impostazioni effettuate dall'utilizzatore in relazione all'applicazione considerata.

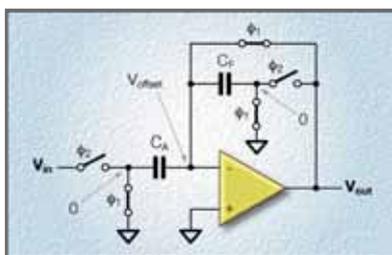
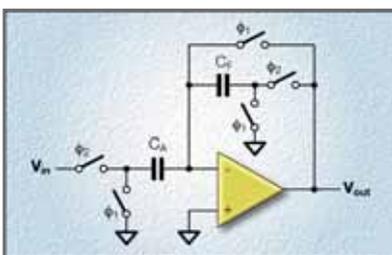


Fig. 3 - Schema di un amplificatore invertente

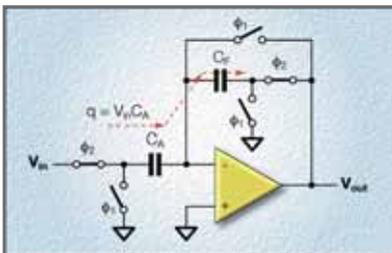


Fig. 3a - Schema di funzionamento durante la fase di acquisizione

Fig. 3b - Schema di funzionamento durante la fase di trasferimento di carica

Realizzazione di un amplificatore invertente

Di seguito si riporterà come esempio l'implementazione di un amplificatore invertente mediante il circuito a capacità commutate riportato in figura 2. L'amplificatore, come visibile in figura 3, risulta composto da un amplificatore operazionale, un condensatore di ingresso (C_A), un condensatore di retroazione (C_F) e cinque commutatori. Il funzionamento del circuito prevede due fasi distinte: acquisizione e trasferimento di carica.

Nella figura 3a viene riportato lo schema di funzionamento durante la fase di acquisizione. In questa fase tutta la carica del condensatore è a massa. L'unica eccezione è la presenza di qualche carica su C_F dovuta alla tensione di offset di ingresso. L'ingresso di C_A è a massa, così come lo è l'uscita di C_F . Poiché la direzione della carica è diversa durante la fase di acquisizione, viene eliminato l'effetto di offset nel corso del trasferimento di carica. Siccome tale misura viene fatta automaticamente durante la fase di acquisizione, essa viene chiamata regolazione di azzeramento automatico (autozero).

Nella figura 3b viene riportato lo schema di funzionamento durante la fase di trasferimento di carica. La quantità di corrente immagazzinata nel condensatore di ingresso, C_A , è data da:

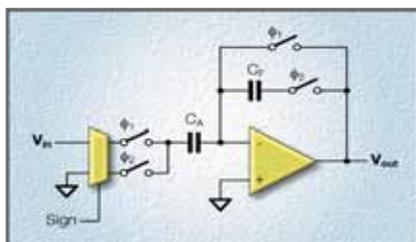


Fig. 4 - Schema di un integratore a capacità commutate

Questa carica può essere trasferita solo attraverso C_F a causa dell'elevato valore dell'impedenza di ingresso dell'amplificatore operazionale. La tensione di uscita per il trasferimento di una carica q attraverso C_F sarà dato da:

$$V_{out} = -q / C_F \quad (\text{eq. 6})$$

In questa equazione il segno negativo è dovuto alla direzione della carica che va dalla massa (massa virtuale) all'uscita dell'amplificatore operazionale.

Dalle due precedenti equazioni si ottiene:

$$V_{out} / V_{in} = - C_A / C_F \quad (\text{eq. 7})$$

Quest'ultima non è nient'altro che la classica equazione dell'amplificatore invertente.

In maniera del tutto analoga è possibile realizzare differenti circuiti utilizzando il medesimo blocco generico a capacità commutate per progettare moduli quali filtri, comparatori, modulatori, integratori e via dicendo.

Una soluzione analogica programmabile

Si consideri adesso l'integratore a capacità commutate riportato in figura 4. L'equazione che definisce la tensione d'uscita dell'integratore è la seguente:

$$V_{out} = V_{out} z^{-1} + V_{in} C_A / C_F \quad (\text{eq. 8})$$

La funzione di trasferimento è quindi data dall'equazione:

$$\text{guadagno} = V_{out} / V_{in} = C_A / C_F (1 - z^{-1}) = 1/s(f_s C_A / C_F) \quad (\text{eq. 9})$$

Da quest'ultima equazione si può osservare che il guadagno dipende dai valori dei condensatori e della frequenza di commutazione. Il cambiamento di uno di questi provoca una modifica del guadagno dell'integratore. Si supponga che all'inizio questo integratore fosse stato progettato per avere un guadagno pari a 2. Nel caso cambino i requisiti e si vuole avere un guadagno pari a 3, è sufficiente aumentare di un fattore pari a 1,5 il valore della frequenza di commutazione. Un altro esempio può essere rappresentato da un filtro. Se questo dispositivo viene progettato utilizzando un circuito a capacità commutate, la frequenza di taglio può essere variata semplicemente modificando in modo analogo a quanto visto prima la frequenza di commutazione. Da quando esposto nel corso dell'articolo, appaiono evidenti i vantaggi legati all'utilizzo di questa metodologia di progettazione. Una soluzione di tipo programmabile contribuisce a ridurre drasticamente il time to market. La presenza di un amplificatore operazionale integrato con circuiti a capacità commutate programmabili consente di variare la funzionalità di un progetto senza per questo dover apportare modifiche di rilievo allo schema circuitale o al layout della scheda, come invece sarebbe richiesto nel caso si utilizzasse un'implementazione con blocchi caratterizzati da funzioni fisse. Osservando le figure riportate appare chiaro che il blocco base della maggior parte dei circuiti analogici - l'amplificatore operazionale - può essere abbinato con condensatori a capacità commutate per consentire la regolazione e il controllo dei circuiti analogici da parte di altri circuiti digitali presenti nel sistema mediante la variazione della frequenza di commutazione (e della resistenza) del circuito. L'elevato livello di integrazione abbinato alla flessibilità di programmazione contribuisce a ridurre il numero di componenti richiesti (BOM), lo spazio occupato sulla scheda e il numero di modifiche da apportare al progetto in modo semplice in ogni fase del processo di progettazione. I progettisti che si occupano dello sviluppo di sistemi e di applicazioni possono quindi introdurre un prodotto in tempi più brevi, un fattore sicuramente decisivo in uno scenario in rapida evoluzione a livello sia di mercato sia di requisiti delle singole applicazioni. ▶