

Avkoppla rätt – en kvantitativ undersökning av parasitinduktans hos olika layoutalternativ

Per Magnusson, Signal Processing Devices Sweden AB, per.magnusson@spdevices.com
Gunnar Karlström, BK Services, gunnar@bkd.se

Sammanfattning

Den här artikeln presenterar resultatet av en undersökning av parasitinduktansen hos olika layouter man kan använda för att ansluta avkopplingskondensatorer till jord- och spänningsplan i ett kretskort. Resultaten visar bland annat att man kan få betydligt bättre avkopplingseffekt för samma antal kondensatorer – och utan att krångla till layouten – om man är medveten om vilken layout som är mest gynnsam. Kortfattat är det fördelaktigt att placera viorna nära varandra samt hålla ledarna mellan kondensatorn och viorna korta och breda. Artikeln ger även kvantitativa svar på hur stor induktansen blir för vissa exempellayouter, vilket är användbart för den som vill veta effekten av en kompromiss, simulera sin avkopplingslayout i en kretssimulator och/eller räkna ut hur många kondensatorer som krävs. Mätningarna har gjorts på ett testkort med hjälp av nätverksanalyser i BK Services labb av Per Magnusson (SP Devices) och Gunnar Karlström (BK Services). Artikeln täcker en del av materialet i skriften "Avkoppla rätt" [1].

Avkoppling

Nästan all elektronik drar en ström som varierar över tiden och hos modern digital elektronik innehåller variationerna ofta frekvenskomponenter från DC till GHz. Samtidigt behöver matningsspänningen vara stabil för att konstruktionen ska fungera och klara EMC-kraven. Detta innebär att impedansen hos matningsspänningssystemet måste vara tillräckligt låg i ett mycket brett frekvensområde.

Vid låga frekvenser, upp till kanske något tiotal kHz, är det spänningsregulatorn som håller spänningen stabil, men däröver måste avkopplingskondensatorer kopplade mellan spänning och jord göra jobbet. Vid ännu högre frekvenser, oftast från något hundratal MHz och upp till drygt 1 GHz, är det plankapacitansen i korten som är mest effektiv. Från några hundra MHz och uppåt spelar även avkopplingskapacitans inuti kretskapslar och inne på chipen en vital roll.

Avkopplingskondensatorerna på kretskortet sänker alltså impedansen hos matningsspänningssystemet inom ett visst frekvensområde och förhindrar därmed att störningar orsakade av strömtransienter från en krets blir för stora och stör andra kretsar (och kretsen själv).

Egenskaper hos en kondensator

En ideal kondensator har en impedans som är omvänt proportionell mot frekvensen. Om så hade varit fallet även för verkliga kondensatorer hade avkoppling varit lätt eftersom impedansen då hade blivit lägre (bättre) ju högre upp i frekvens man kommer. Tyvärr har verkliga kondensatorer även en parasitinduktans som gör livet mer intressant för kretskortskonstruktörer. Denna induktans brukar betecknas ESL, ekvivalent serieinduktans. Kondensatorn har även resistiva förluster kallade ESR, ekvivalent serieresistans. En modell som väl förutsäger beteendet upp till åtminstone 3 GHz för en modern keramisk avkopplingskondensator (t.ex. i kapsel 0402) visas i *Figur 1*.



Figur 1. Modell av en avkopplingskondensator.

Kondensatorn är alltså en serieresonanskrets. I området en bit under självresonansfrekvensen (SRF) dominerar kapacitansen och kondensatorn beter sig som en god kapacitans. En bit över resonans är det istället induktansen som dominerar och komponenten beter sig huvudsakligen som en induktans. Vid resonansfrekvensen är impedansen som lägst och lika med ESR.

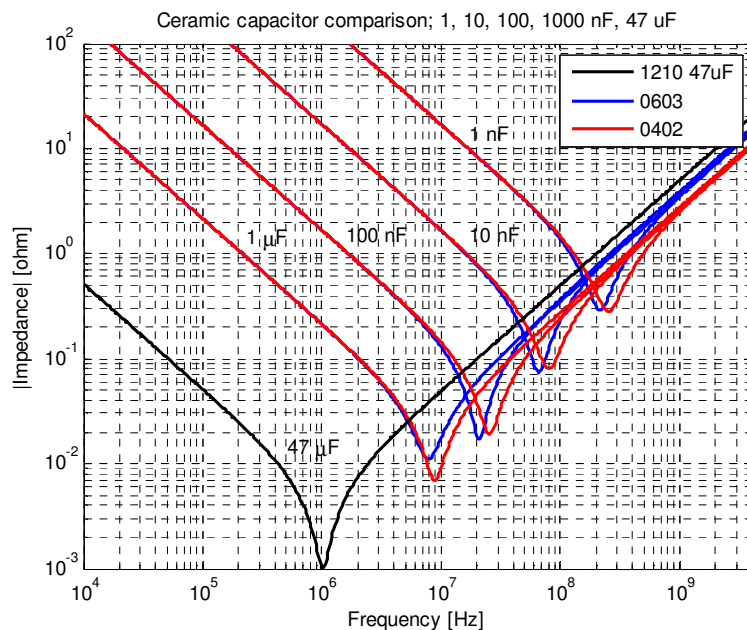
Tabell 1 visar data för ett antal olika tänkbara avkopplingskondensatorer medan Figur 2 visar impedansen som funktion av frekvens för dessa kondensatorer. Informationen är hämtad från Murata Chip and S-parameter Library [2].

Notera att ESL är ca 0,4 nH för en kondensator i 0402-kapsel och 0,6 nH för 0603. En viktig poäng här är att ESL är så gott som helt oberoende av kapacitansen. Den beror bara på kapseln. Kondensatorer på 1 nF och 1 μ F har alltså samma ESL om kapseln är densamma. Detta är något som det ibland råder missuppfattningar om.

Kapsel	Komponent	C	ESL	ESR	Resonansfrekvens (SRF)
0402	1 nF X7R	0,95 nF	0,42 nH	280 m Ω	252 MHz
	10 nF X7R	9,5 nF	0,42 nH	80 m Ω	80 MHz
	100 nF X7R	94 nF	0,41 nH	19 m Ω	26 MHz
	1 μ F X5R	0,78 μ F	0,44 nH	7 m Ω	8,6 MHz
0603	1 nF X7R	0,93 nF	0,58 nH	290 m Ω	217 MHz
	10 nF X7R	9,3 nF	0,62 nH	52 m Ω	66 MHz
	100 nF X7R	97 nF	0,61 nH	17 m Ω	21 MHz
	1 μ F X7R	0,72 μ F	0,56 nH	9 m Ω	7,9 MHz
1210	47 μ F X5R	31 μ F	0,79 nH	1 m Ω	1,0 MHz

Tabell 1. Data för några kondensatorer, enligt Murata [2].

Man kan också notera att SRF är lägre än man kanske skulle ha gissat för t.ex. 100 nF och 1 μ F som är vanliga att använda i avkopplingsammanhang. Man ska dock inte förledas att tro att en kondensator är värdelös som avkoppling över sin SRF. Det viktiga är att impedansen är låg och det är den långt över SRF, även om kondensatorn då beter sig som en induktor. Om t.ex. impedansen är ok vid en tiondel av SRF och man har samma krav 10 gånger över SRF, så är alltså kondensatorn tillräckligt bra även vid denna höga frekvens.

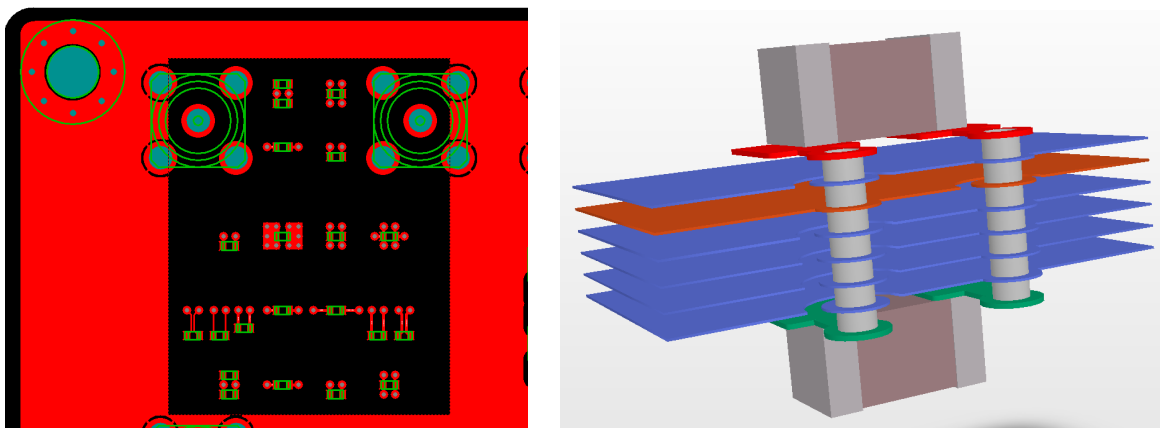


Figur 2. Impedans som funktion av frekvens för kondensatorerna i Tabell 1.

Observera att man knappast vinner något vid höga frekvenser på att använda en kondensator med hög SRF om det inte samtidigt innebär att ESL minskar, vilket den alltså inte gör om man håller sig i samma kapsel. Den huvudsakliga effekten av att välja en lägre kapacitans (t.ex. 10 nF istället för 1 μ F) blir att avkopplingsverkan vid låga frekvenser (där kapacitansen dominerar) blir mycket sämre medan den inte blir bättre vid höga frekvenser (där induktansen dominerar).

Layoutens inverkan

Induktansen är alltså viktig för hur bra avkopplingen fungerar över kondensatorernas resonansfrekvens. Layouten bidrar oundvikligen med induktans och det visar sig att layoutens induktans lätt kan bli större än induktansen i själva kondensatorn om man inte vet hur man bör optimera layouten. För att kunna göra välgrundade val om vilken layout man bör välja samt hur mycket (eller lite) sämre det blir om man tvingas frångå bästa tänkbara layout behövs kvantitativa data. För att råda bot på detta behov så konstruerade vi ett testkort lämpat att mäta upp induktansen hos olika layouter med hjälp av S_{21} -mätningar med en nätverksanalysator. Testkortets layout visas i *Figur 3*.



Figur 3. Testkortets layout samt kortet i genomskärning. Undersidans layout är identisk.

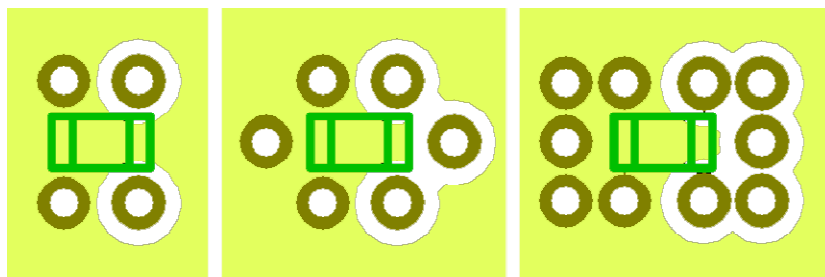
Layout						
C/C-avst., vior:	3,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Ledarbredd:	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2
Ledarlängd:	1,1	1,7	1,7	2,0	2,0	1,2
L, ovansidan	1,33 nH	1,82 nH	1,60 nH	1,68 nH	1,44 nH	1,18 nH
L, undersidan	1,65 nH	2,16 nH	1,86 nH	1,96 nH	1,72 nH	1,46 nH
Layout						
C/C-avst., vior:	2,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Ledarbredd:	0,2	0,2	0,2	0,2	-	0,2
Ledarlängd:	0,63	0,65	0,65	0,65	-	0,65
L, ovansidan	0,90 nH	0,78 nH	0,55 nH	0,64 nH	0,58 nH	0,50 nH
L, undersidan	1,23 nH	1,05 nH	0,71 nH	0,77 nH	0,71 nH	0,76 nH

Tabell 2. Uppmätt parasitinduktans hos några olika avkopplingslayouter. Måtten är i mm.

Genom att samma layout finns både på ovan- och undersidan kan man se effekten av olika långa vior. Resultaten från mätningarna av parasitinduktansen hos ett antal olika layouter (inklusive induktansen hos kondensatorn) visas i *Tabell 2*.

Man kan göra några intressanta observationer utgående från mätresultaten:

- Om man jämför A med F och G med H ser man att man vinner på att hålla samman viorna riktigt tätt. Vid 0,8 mm centrum-till-centrum-avstånd är induktansen ca 0,15 nH lägre för en kondensator på ovansidan och ca 0,2 nH lägre för en kondensator på undersidan, än om viorna sitter långt isär. Detta vid i övrigt lika långa ledare.
- En jämförelse av B och C respektive D och E visar att man kan sänka induktansen genom att göra ledare breda. Detta är bra att tänka på om man tvingas ha viorna en bit bort från kondensatorn.
- B och D samt C och E visar att induktansen minskar om ledarna läggs tätt intill varandra istället för en bit bort, även om ledarlängden ökar något av att man drar ihop ledarna.
- Värdena från C, F och H (samt A och G) visar att en förkortning av ledarlängden med 1 mm (dvs när båda viorna sitter 0,5 mm närmare kondensatorn) ger en minskad induktans med 0,4 nH. Resultatet gäller för ledare som är 0,2 mm breda och principen är viktig och visar att det är extremt viktigt att hålla nere ledarlängden om man vill få ut så bra avkopplingseffekt som möjligt för varje kondensator. Att induktansen är i storleksordningen 0,5 nH/mm för vanliga ledare kan vara en bra tumregel.
- Medelvärdet av induktansskillnaden för kondensatorer monterade på undersidan respektive ovansidan i de fall viorna sitter på 0,8 mm avstånd är 0,28 nH. Man kan alltså vinna en del på att montera kondensatorerna på den sida av kortet som är närmast planen som ska avkopplas.
- Skillnaden mellan H och I visar att ett extra par av vior minskar induktansen. När det gäller fall I så är totala induktansen bara 0,11 nH högre än den induktans som Murata anger för själva kondensatorn (0,44 nH), vilket tyder på att layouten är ungefär så bra som den kan bli.
- H och I visar också att man vinner mer på att dubblera viorna när viorna är långa (alltså när kondensatorn sitter på en sida av kortet långt från spänningsplanet). Detta beror såklart på att viorna står för en större del av induktansen om viorna är långa och att det främst är viainduktansen man reducerar med denna metod.
- Skillnaden mellan H och L visar när det kan vara ok att låta två kondensatorer dela samma vior samt när det är mycket bättre att låta kondensatorerna ha sina egna vior. Att använda två kopior av layout H hade gett 0,39 nH (ovansidan) och 0,53 nH (undersidan). Layout L har inte så mycket högre induktans på ovansidan (0,50 nH dvs. 25 % högre), men på undersidan får man inte valuta för pengarna man betalt för sin extra kondensator (0,76 nH dvs. 50 % högre), så när viorna är långa kan man knappast rekommendera att låta flera kondensatorer dela på samma vior.
- En jämförelse av I, J och K ger det överraskande resultatet att induktansen ökar när fler än två vior används per lödyta. Fem vior är visserligen något bättre än tre, men fortfarande inte bättre än två. Förklaringen till detta är med största sannolikhet att de tre respektive fem viorna skär en relativt lång slits i de plan de passerar genom och därmed ökar induktansen i själva planen. Detta illustreras i *Figur 4*.



Figur 4. Jordplanet runt layouterna med 2, 3 respektive 5 vior per lödyta. Med 3 och 5 vior skärs planet sönder och planets induktans ökar nära kondensatorn.

Slutsatser

- Vid låga frekvenser (under SRF) är det kapacitansen som avgör hur bra en avkopplingskondensator fungerar: Maximera den, dvs. använd så stort värde som möjligt.
- Vid höga frekvenser (över SRF) dominerar induktansen: Minimera den, dvs. välj en kapsel med låg induktans och gör en bra layout.
- Avkopplingskondensatorer är effektiva långt över sin resonansfrekvens.
- Håll ledare mellan kondensator och vior korta.
- Gör ledarna så breda som möjligt.
- Lägg viorna nära varandra.
- Tumregel: 1 mm ledare har ca 0,5 nH induktans.
- Sätt helst kondensatorerna på den sida av kortet som är närmast det avkopplade planet, dvs. minimera viornas längd.
- Skär inte sönder planen med tätt liggande vior som planet inte kommer emellan.
- Vill man minska induktansen ytterligare kan man sätta flera vior per lödyta (utan att skära sönder planen).
- Låt varje kondensator få egna vior. (Kondensatorer på motsatta sidor kan dock dela vior.)

Referenser

- [1] P. Magnusson & G. Karlström, "Avkoppla rätt", bok utgiven av BK Services, <http://www.bk-services.se/>
- [2] "Murata Chip S-Parameter & Impedance Library Version 3.13.1", <http://www.murata.com/designlib/mcsil/index.html>