

# Progettazione con l'ausilio del software ADS di circuiti integrati RF per sistemi wireless

Laboratorio di:

## **Elettronica dei Sistemi Wireless (9 CFU)**

Il anno della Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica

Primo semestre - A.A. 2015/16

### **Federico Baronti**

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Via G. Caruso 16 - I-56122 - Pisa – Italy

*Stanza:* A-2-12

*Tel.* 050-2217.581

*Email:* [federico.baronti@unipi.it](mailto:federico.baronti@unipi.it)

*Ricevimento:* venerdì 15-18

Si consiglia di contattarmi preventivamente per concordare un appuntamento

*Titolare del corso:* Prof. Bruno Neri

# Programma esercitazioni

- Introduzione alla progettazione RF
- Introduzione all'uso di **Advanced Design Software (ADS)** <http://www.home.agilent.com/>
- Progettazione (a livello di schematico) di **LNA bipolare**
- Progettazione (a livello di schematico) di **LNA CMOS**
- Progettazione (a livello di schematico) di **Mixer (Cella di Gilbert)**
- **Verifica**

# Orario

| 2M Elettronica |                             |                                |                                |                                |                             |    |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----|
|                | Lu                          | Ma                             | Me                             | Gi                             | Ve                          | Sa |
| 8:30/9:30      | Prog.sens.microsist.<br>B26 |                                |                                | Prog.sens.microsist.<br>B26    | Prog. mixed signal<br>B23   |    |
| 9:30/10:30     | Prog.sens.microsist.<br>B26 |                                | Progett.circ.digit.<br>C44     | Prog.sens.microsist.<br>B26    | Prog. mixed signal<br>B23   |    |
| 10:30/11:30    | Prog. mixed signal<br>B23   | Progett.circ.digit.<br>B26     | Prog.sens.microsist.<br>IDR2   | Elettron. sist. wirelss<br>B23 | Progett.circ.digit.<br>B23  |    |
| 11:30/12:30    | Prog. mixed signal<br>B23   | Progett.circ.digit.<br>B26     | Prog.sens.microsist.<br>IDR2   | Elettron. sist. wirelss<br>B23 | Progett.circ.digit.<br>B23  |    |
| 12:30/13:30    | Prog. mixed signal<br>B23   | Progett.circ.digit.<br>B26     |                                |                                |                             |    |
| 13:30/14:30    |                             |                                |                                |                                | Prog.sens.microsist.<br>B26 |    |
| 14:30/15:30    | Progett.circ.digit.<br>B26  | Elettron. sist. wirelss<br>B26 | Elettron. sist. wirelss<br>B26 |                                | Prog.sens.microsist.<br>B26 |    |
| 15:30/16:30    | Progett.circ.digit.<br>B26  | Elettron. sist. wirelss<br>B26 | Elettron. sist. wirelss<br>B26 | Prog. mixed signal<br>SI 3     |                             |    |
| 16:30/17:30    |                             | Elettron. sist. wirelss<br>B26 | Elettron. sist. wirelss<br>B26 | Prog. mixed signal<br>SI 3     |                             |    |
| 17:30/18:30    |                             |                                |                                | Prog. mixed signal<br>SI 3     |                             |    |

# Altre info

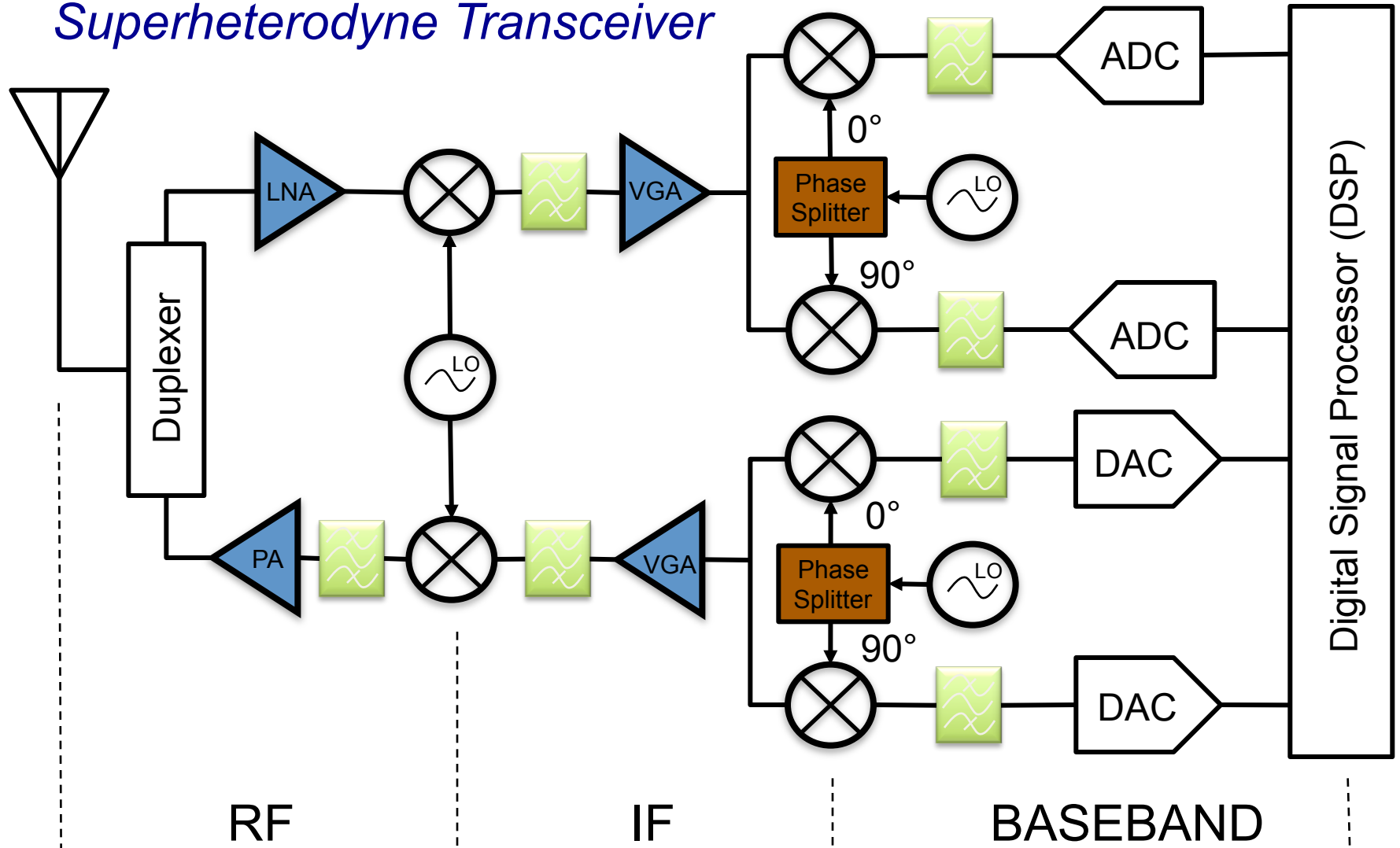
- Pagina web del corso:
  - <http://www.iet.unipi.it/f.baronti/didattica/ESW/ESW.html>
- Uso PC (quelli sulla mensola) in aula:
  - Account: *banco*
  - Password: *studele*
  - Software installato: ADS 2013
  - Design kit: AMS-S35 (0,35  $\mu\text{m}$  HBT BiCMOS)

# Introduzione alla Progettazione RF

- Basic of RFIC Design
  - An RF Communication System
  - Design Metrics & Challenges for RF building blocks
  - RFIC Design Flow
  - Modelling & Simulation
  - RFIC CAD tools
- RF Circuit Simulation

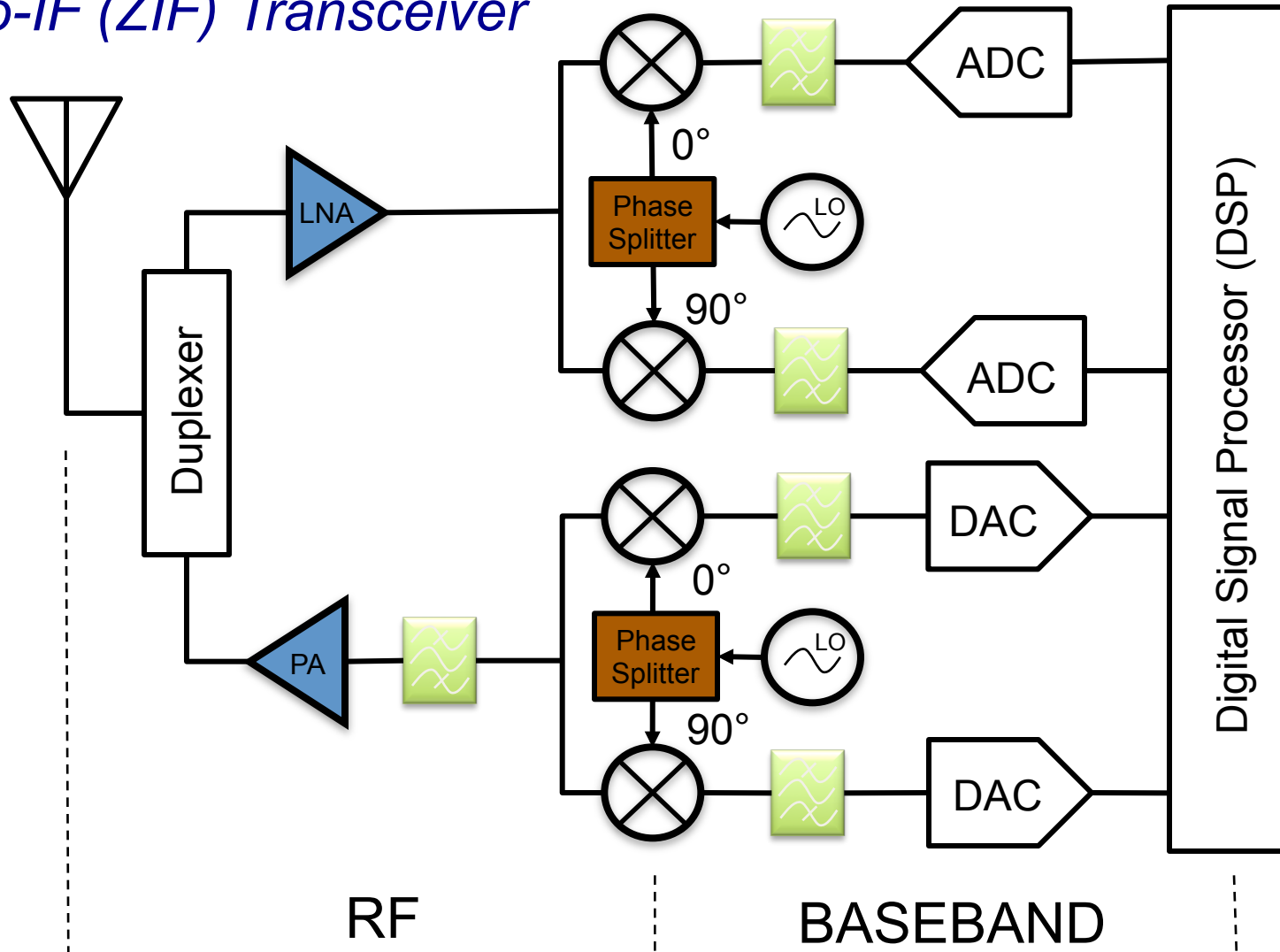
# An RF Communication System

## *Superheterodyne Transceiver*



# An Alternative RF Comm. System

## *Zero-IF (ZIF) Transceiver*



# Components of an RF System

- RF

- Duplexer
- LNA: Low Noise Amplifier
- PA: Power Amplifier
- RF mixer
- Local Oscillator
- Filter

- IF

- VGA: Variable Gain Amplifier
- Modulator
- Demodulator
- Filter

- Baseband

- Mixed-signal

- ADC: Analog to Digital Converter
    - DAC: Digital to Analog Converter

- Digital

- Digital Signal Processor (DSP)



# SOC: System-on-a-Chip

- All components of a system are implemented on the same VLSI chip
- Requires same technology (usually CMOS) used for all components
- Components not implemented on present-day SOC:
  - “Antenna”
  - Power amplifier (PA)

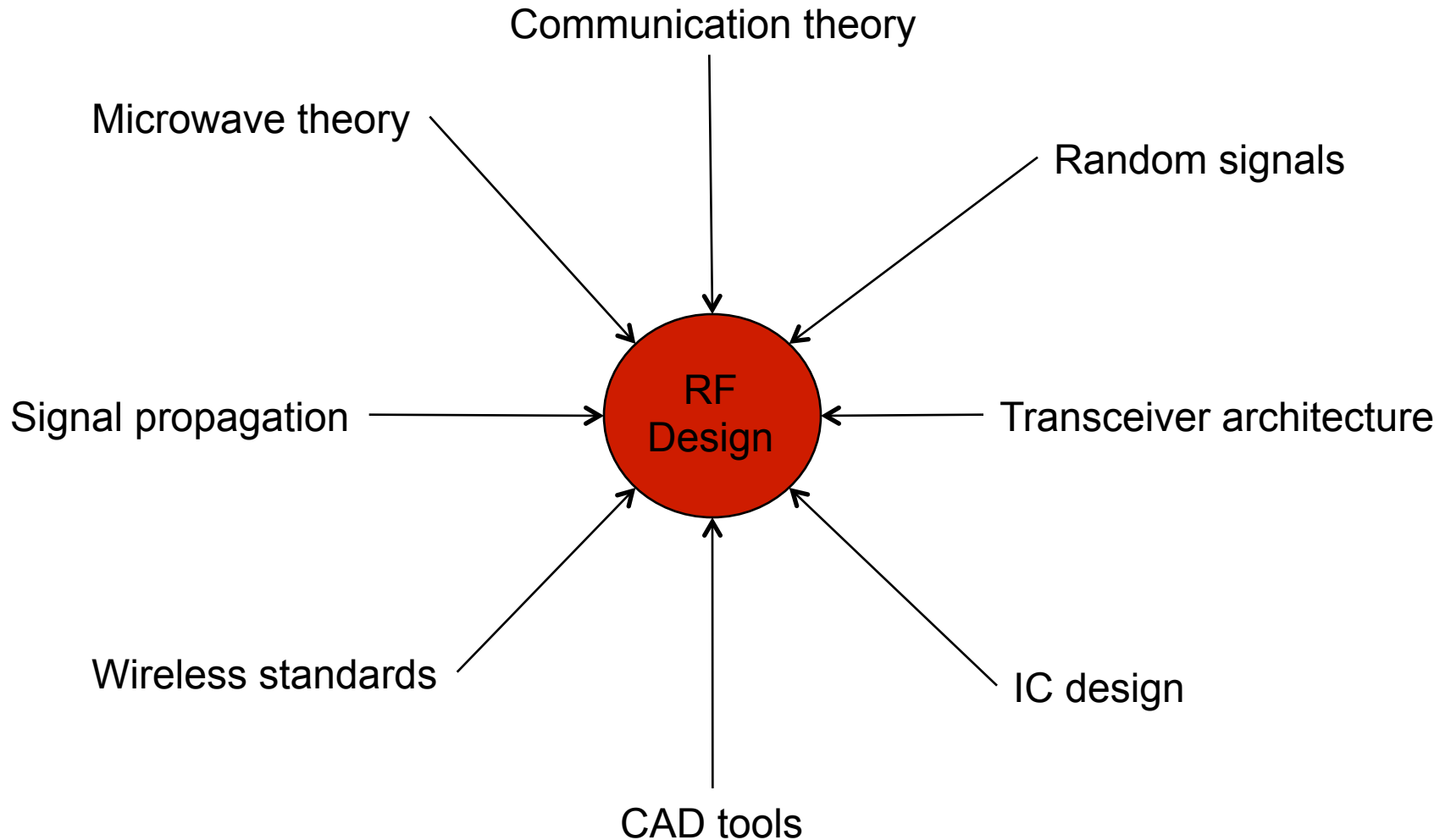
# SIP: System-in-Package

- Several chips or SOC are included in a package
- Routing within SIP may be provided via a semiconductor substrate
- RF communication system may contain:
  - SIP, containing
    - SOC consisting of
      - CMOS digital and mixed-signal components (DSP, ADC, DAC)
      - CMOS LNA and Mixers
      - CMOS DDS (Direct Digital Synthesizer)
      - Filters
  - Power amplifier (PA)
  - Antenna

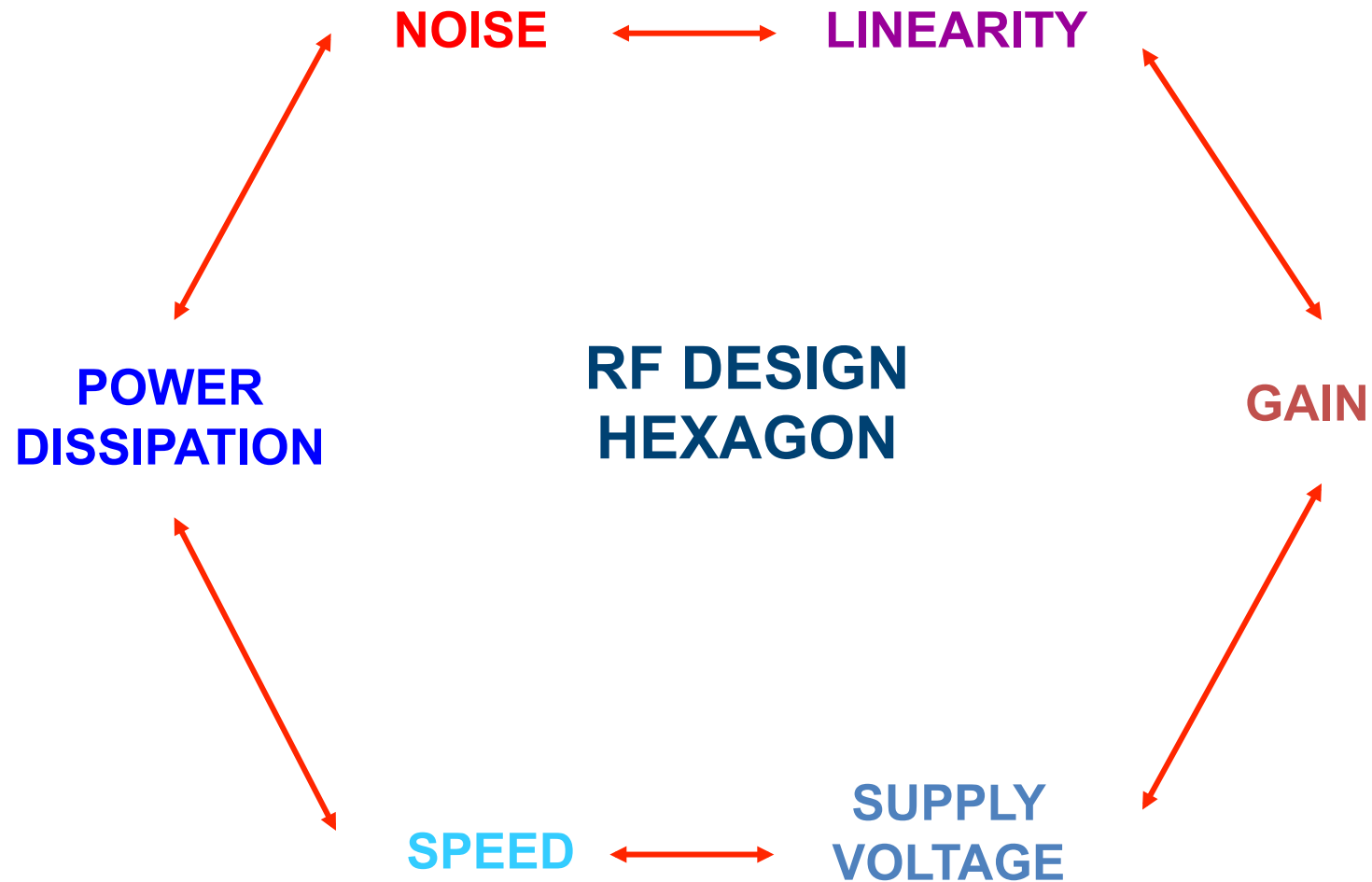
# RF Technologies

- GaAs:
  - High frequency
  - High power
  - Used in PA and front-end switches
  - Low yield, expensive to manufacture
  - Not integrated on silicon chips
- Silicon bipolar and BiCMOS
- Silicon CMOS, suitable for tens of GHz
- SiGe
  - Possible replacement for GaAs
  - Can be integrated on silicon chips

# Dimension of RF Design



# Analog/RF Design Trade-Off



# Block Design Metrics

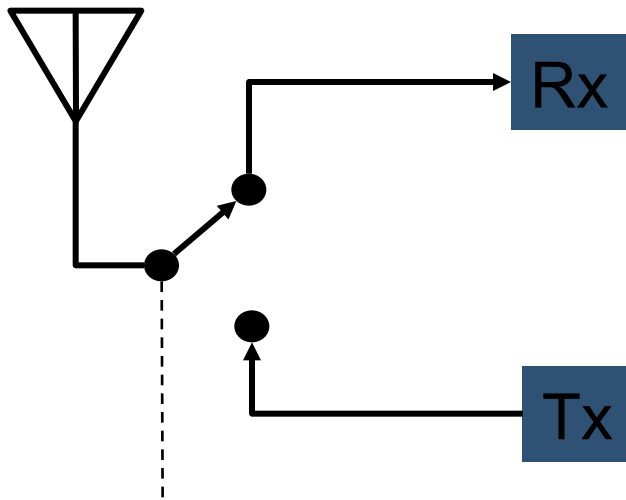
- Gain
- Noise Figure
- Linearity
  - 1-dB Compression Point
  - 3<sup>rd</sup> Order Intercept Point
  - Dynamic range
  - Spurious Free Dynamic Range
- Link budget
- Stability
- Sensitivity
- I/O Impedance Matching
- Cost

# Duplexer

- TDD: Time-Division Duplexing

## Duplexing

- Same Tx and Rx frequency
- RF switch (PIN or GaAs FET)
- Less than 1 dB loss

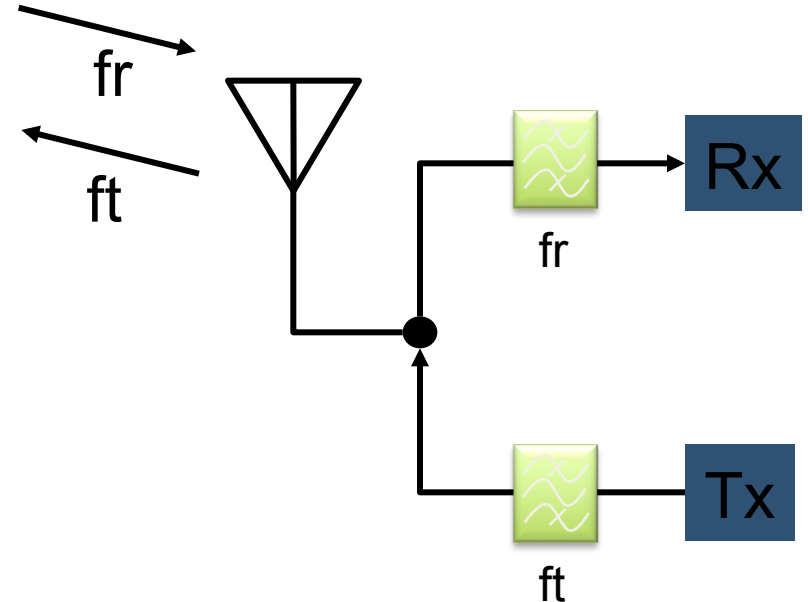


TDD command

- FDD: Frequency-Division Duplexing

## Division Duplexing

- Tx to Rx coupling (-50 dB)
- More loss (3 dB) than TDD
- Adjacent channel leakage



# LNA: Low Noise Amplifier

- Amplifies received RF signal
- Typical characteristics:
  - Noise figure 2 dB
  - IP3 – 10 dBm
  - Gain 15 dB
  - Input and output impedance 50  $\Omega$
  - Reverse isolation 20 dB
  - Stability factor > 1
- Technologies:
  - Bipolar
  - CMOS



# PA: Power Amplifier

- Feeds RF signal to antenna for transmission
- Typical characteristics:
  - Output power            +20 to +30 dBm
  - Efficiency                30 % to 60 %
  - IMD                        – 30 dBc
  - Supply voltage          3.8 to 5.8 V
  - Gain                        20 to 30 dB
  - Output harmonics      – 50 to – 70 dBc
  - Power control          On-off or 1-dB steps
  - Stability factor          > 1
- Technologies:
  - GaAs
  - SiGe

# Mixer or Frequency (Up/Down) Converter

- Translates frequency by subtracting/adding local oscillator (LO) frequency
- Typical characteristics:
  - Noise figure 12 dB
  - IP3 +5 dBm
  - Gain 10 dB
  - Input impedance 50  $\Omega$
  - Port to port isolation 10-20 dB
- Technologies:
  - Bipolar
  - CMOS

# Analog/RF Design Flow

- System Specs

- Behavioral models

- Matlab, Excel, ...
- Define Block requirements

System  
Level  
Exploration

- Circuit design

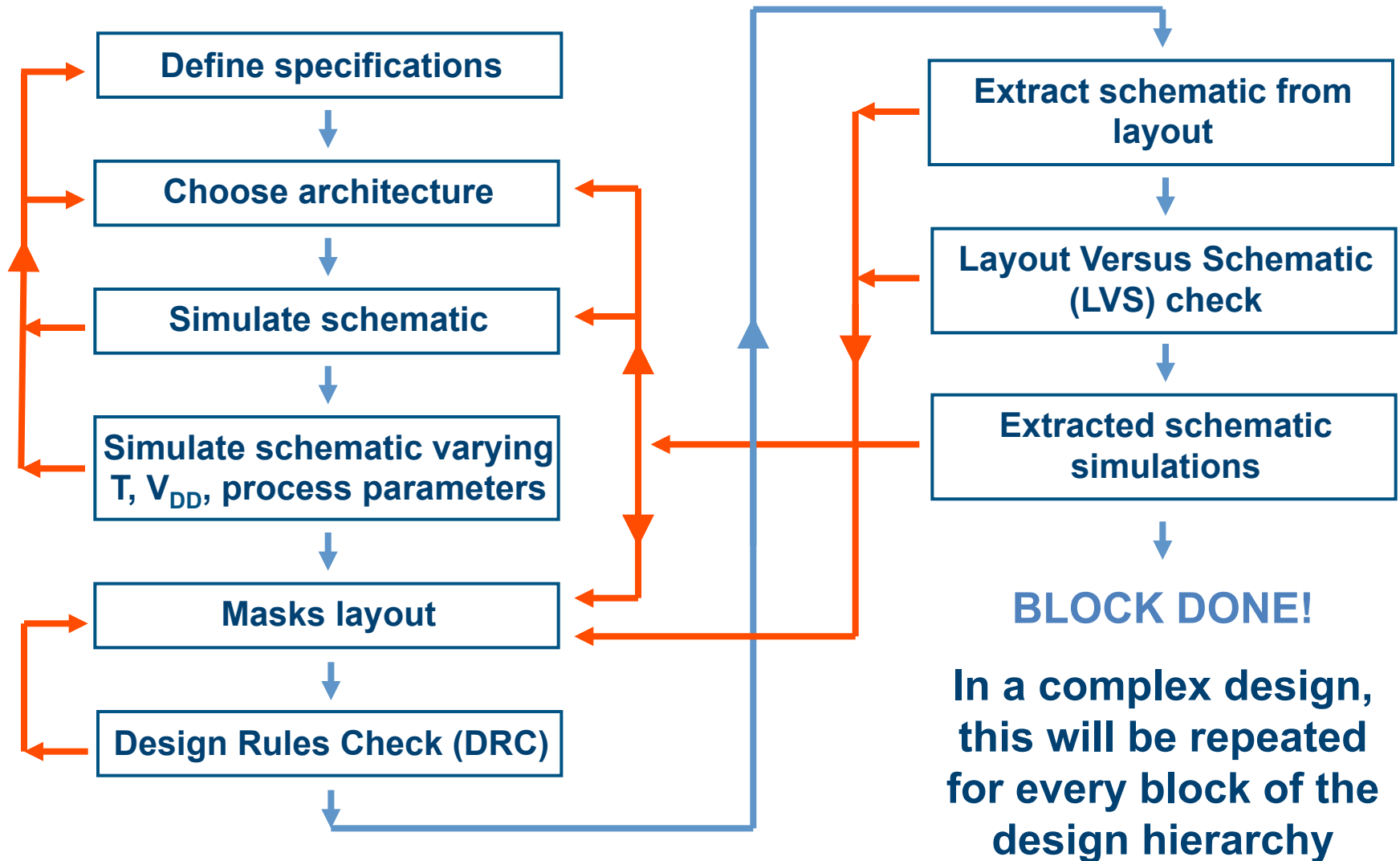
- Size, Simulate and iterate

- Layout design

- Verify and iterate

Circuit  
Sizing &  
Synthesis

# Analog/RF Design Flow



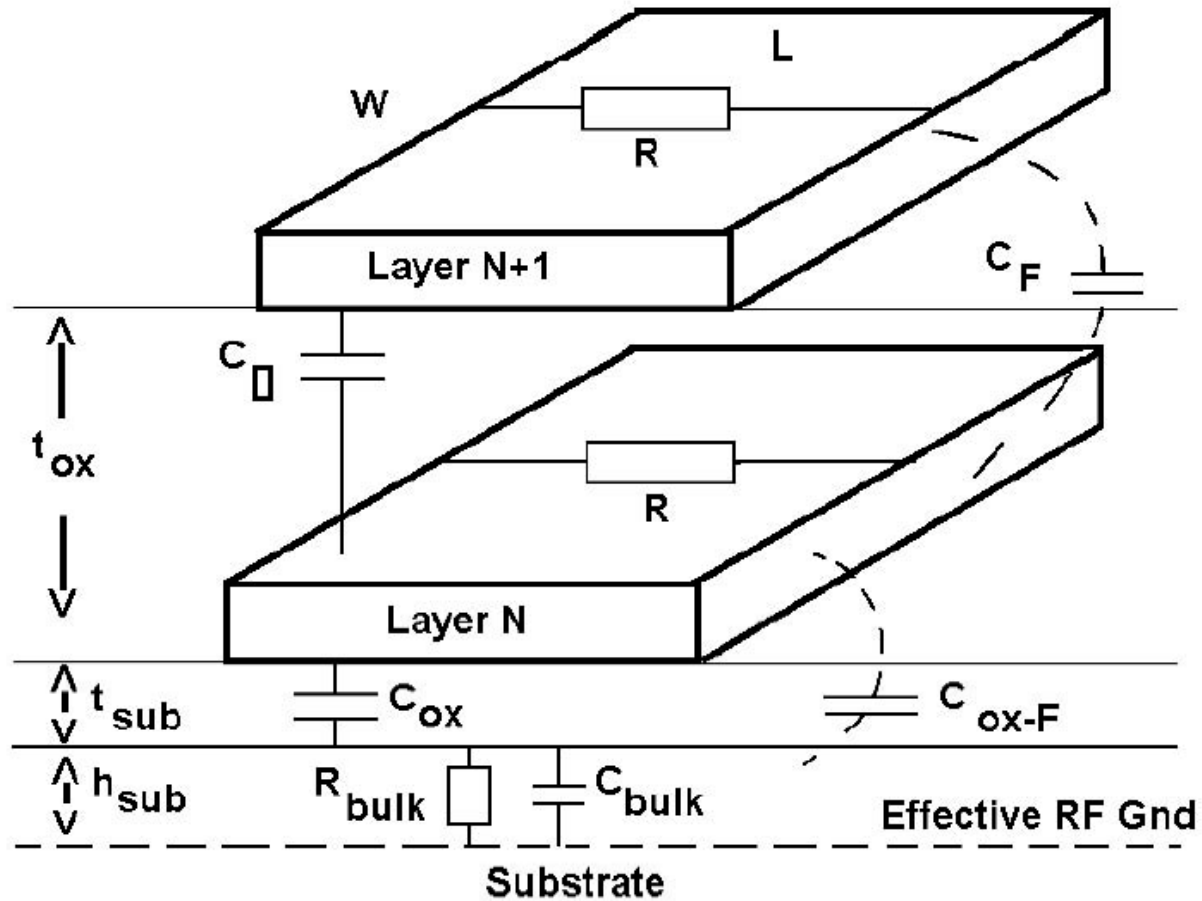
# RFIC Simulation

- Accurate modelling (active and passive components)
- EM simulators
- RF circuit simulators
  - Periodic Steady State simulation algorithms
    - Harmonic Balance (ADS)
    - Shooting (SpectreRF)

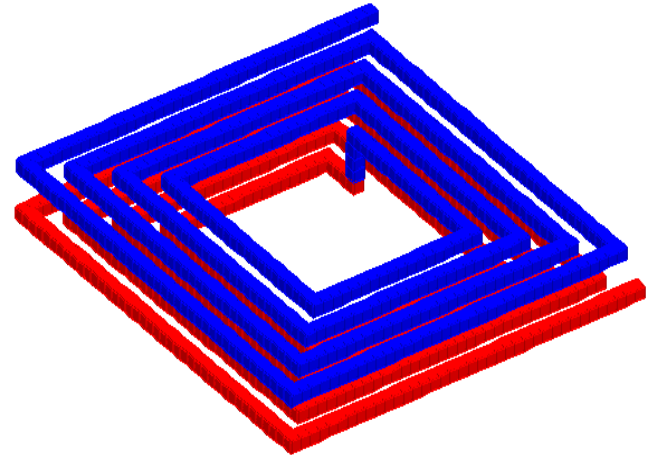
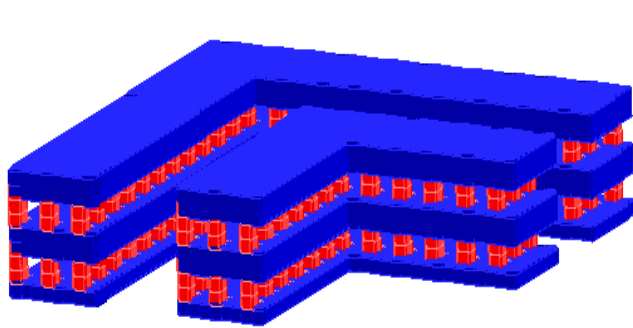
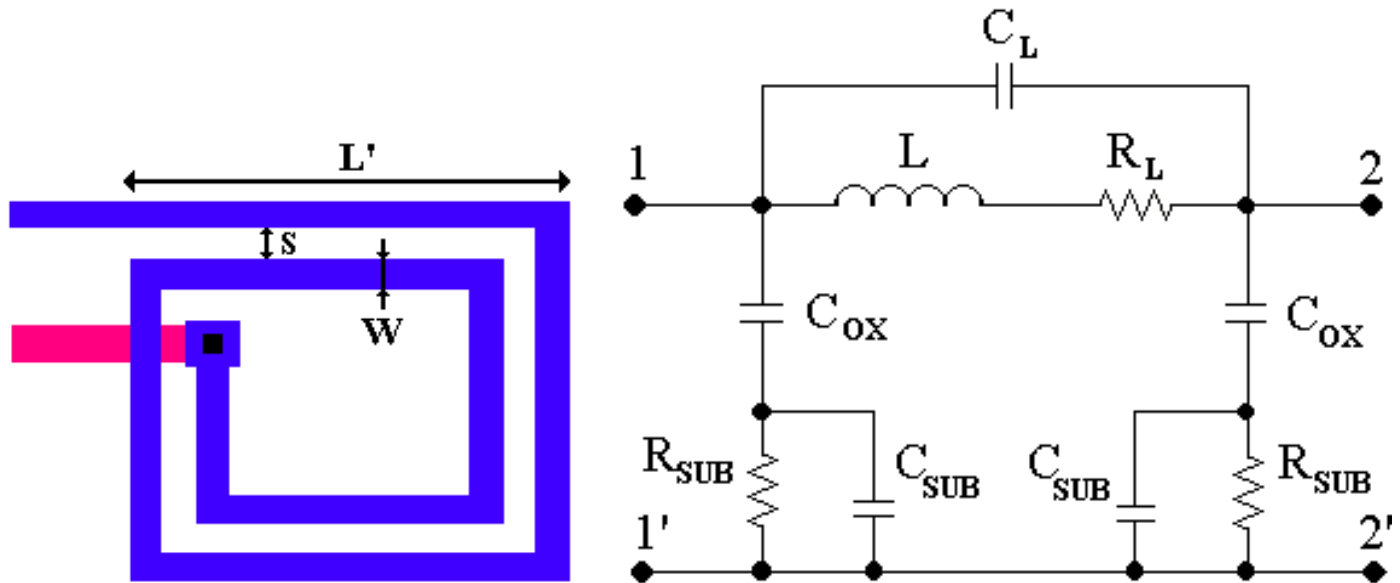
# Modelling

- Active Components
  - Bipolar transistors
  - MOSFET transistors
- Passive Components
  - Capacitors
  - Inductors
  - Resistors
  - Transformers
  - Interconnections
  - Package

# Capacitors

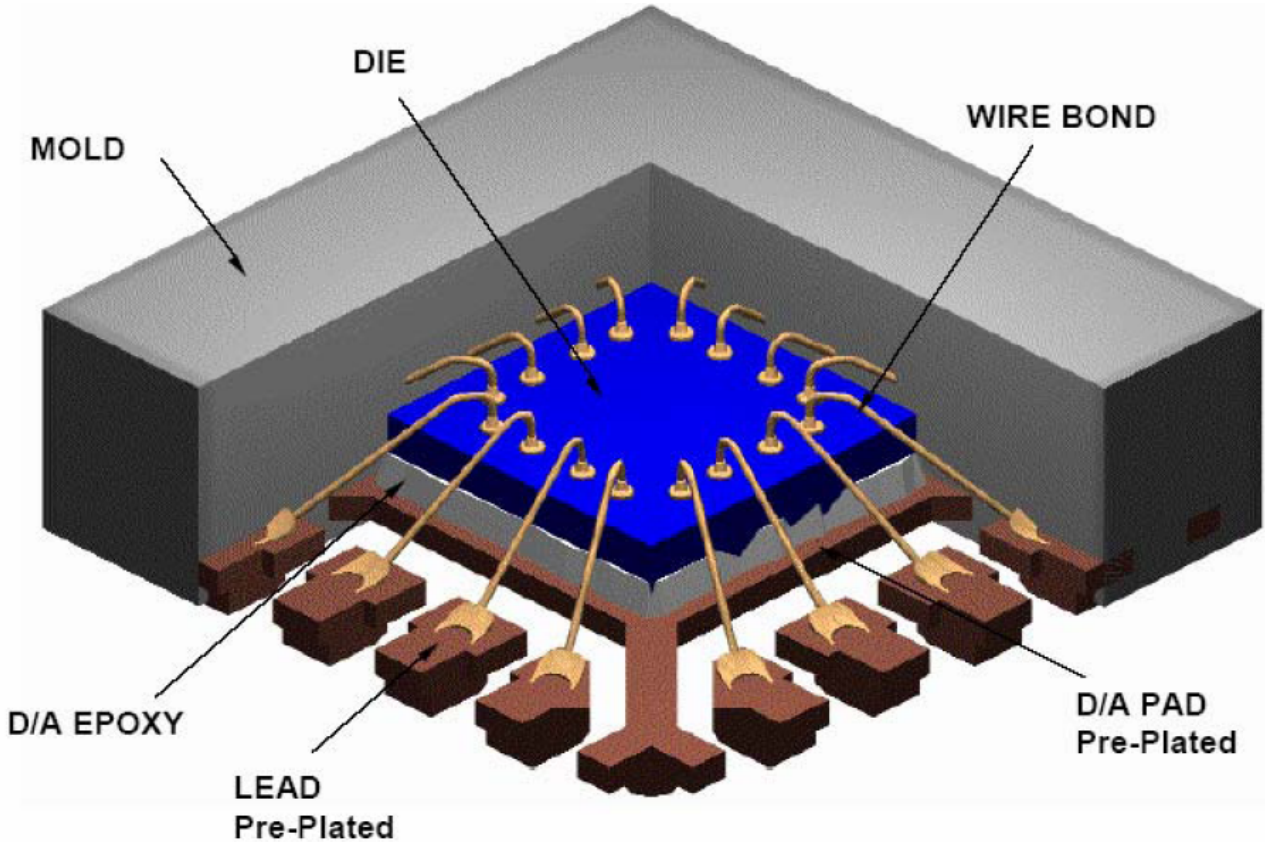
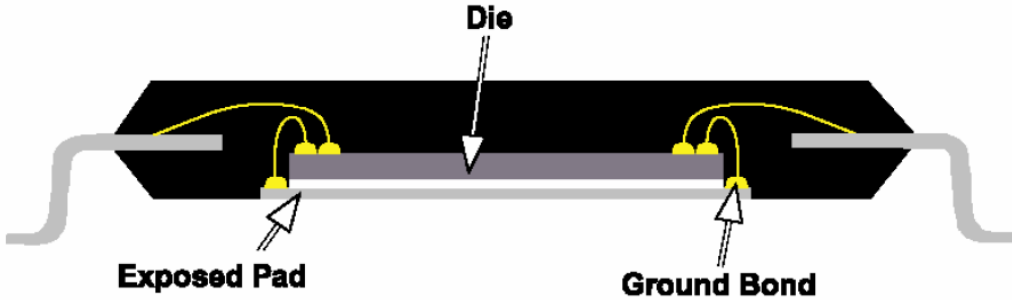


# Inductors

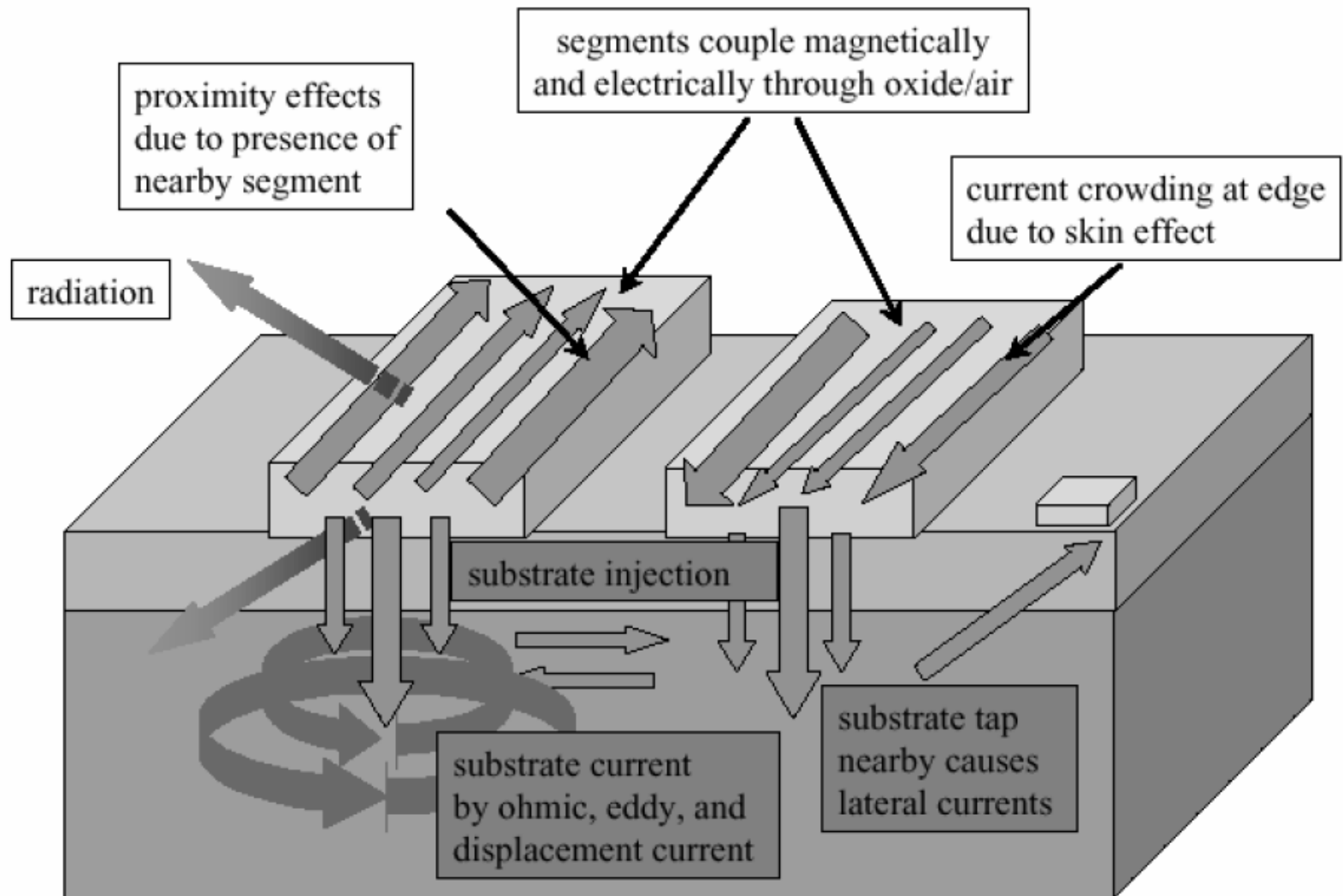




# Package



# Interazione Elettromagnetiche

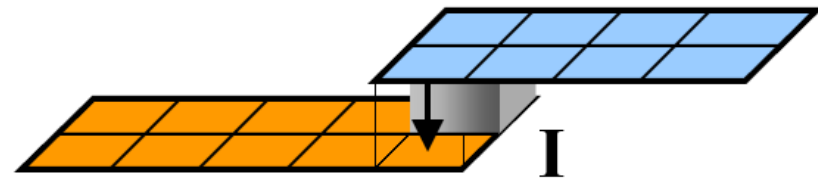


# Metodi Numerici e Dominio

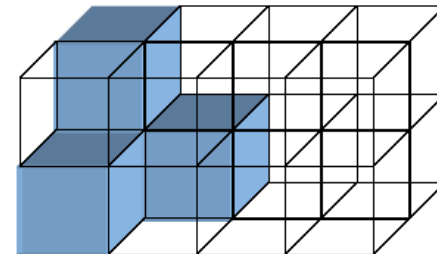
- 2 D (planare)



- 2 D e ½ (planare + vias)



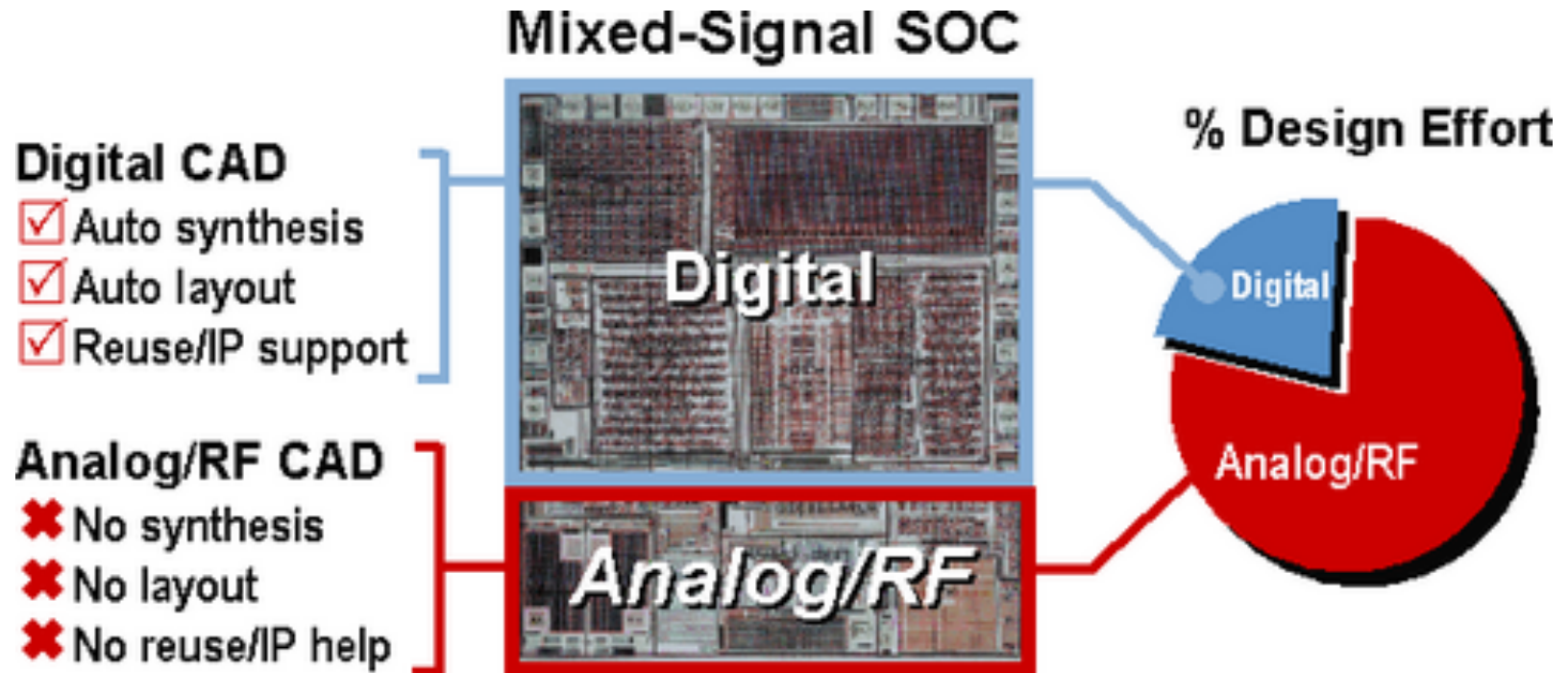
- 3 D (tridimensionale)



# Alcuni Simulatori EM

- ASITIC (2D e  $\frac{1}{2}$ , PEEC)
- Microwave Office EM Sight (2D e  $\frac{1}{2}$ , MoM)
- Momentum (2D e  $\frac{1}{2}$ , MoM)
- High Frequency Structures Simulator (3D, FEM)
- Finite Difference Time Domain (3D, FDE)
  - PEEC: Partial Element Equivalent Circuit
  - MoM: Metodo dei Momenti
  - FEM: Finite Element
  - FDE: Finite Difference

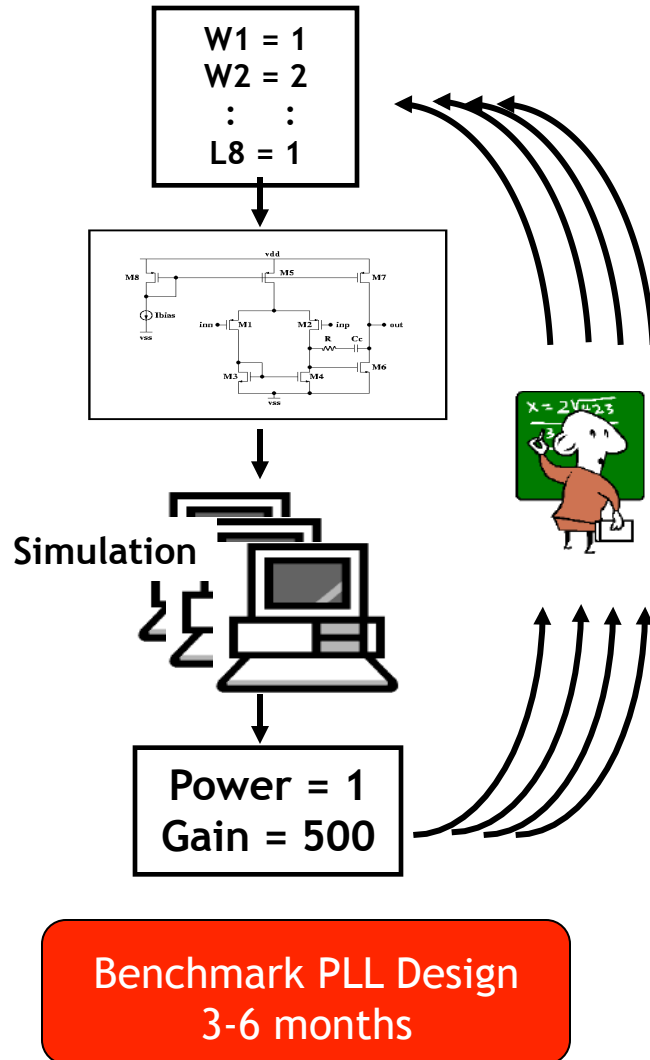
# CAD Supports



Exploration?

Optimality?

# Construction-Simulation Paradigm

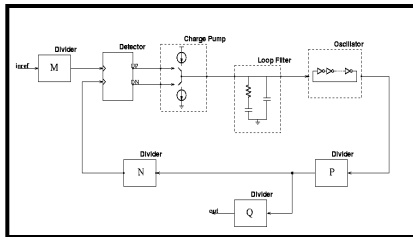


## Challenges

- Time intensive
- Labor intensive
- Highly iterative
- Non optimal
- Non re-usable
- Non scalable
- Dependent on individual skills

# Analog Synthesis: an opportunity

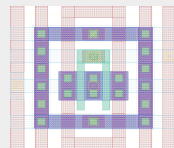
Jitter = 10  
Static Phase Error = 100



**Optimization**



W1 = 1  
W2 = 2  
⋮  
L8 = 1

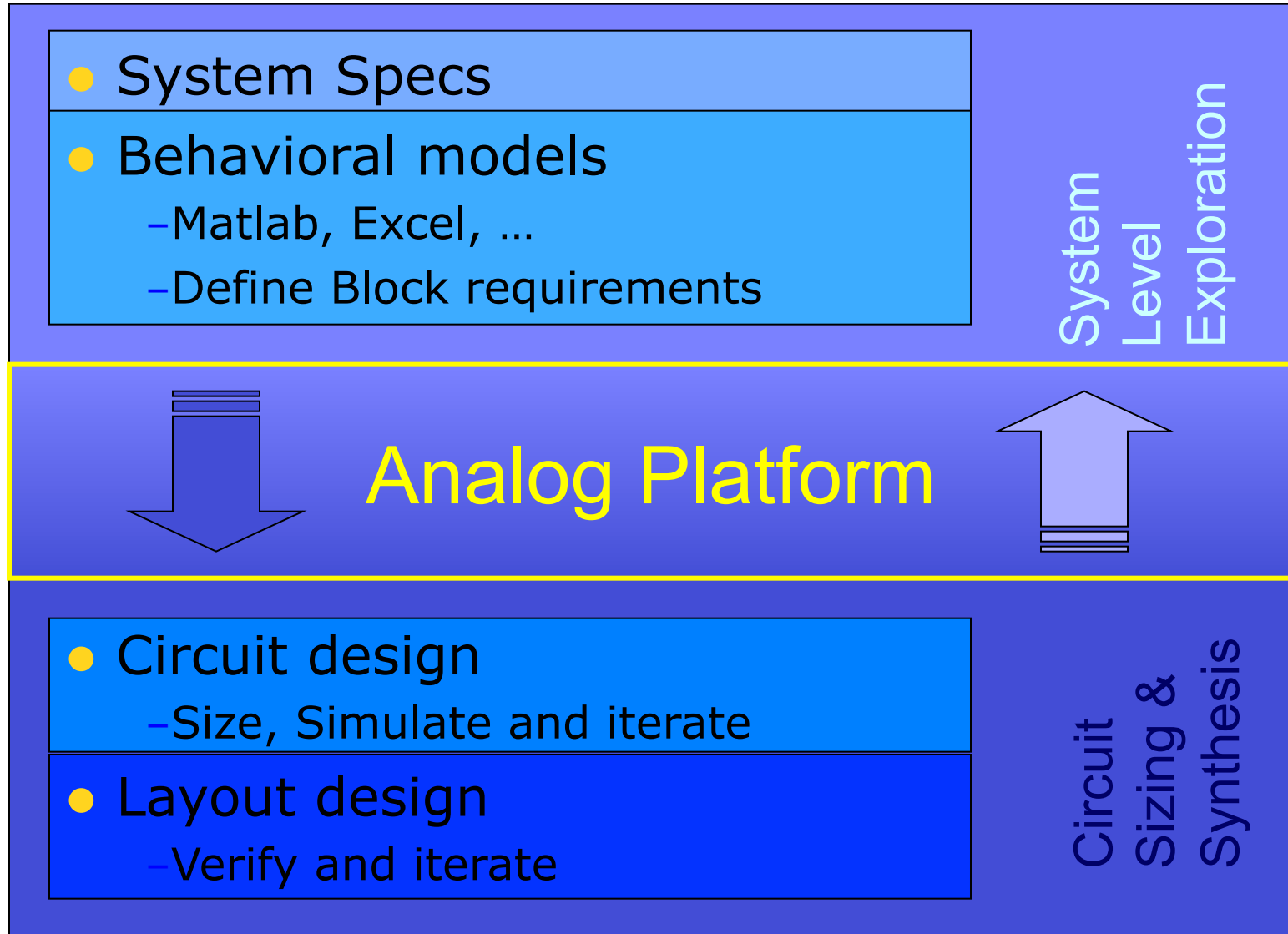


Benchmark PLL Design  
3-6 hours

## Benefits

- Design Time
- Design Productivity
- Robustness
- Optimality
- Re-usability
- Scalability
- Portability

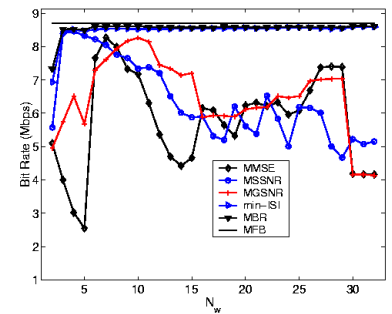
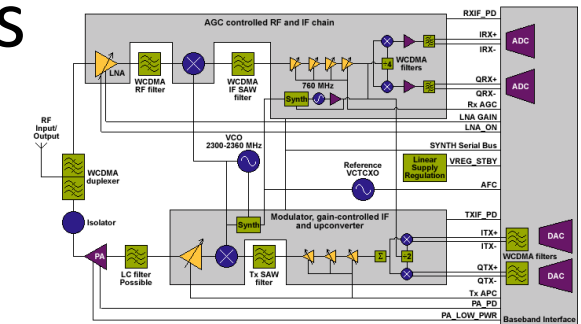
# Analog Design Platform





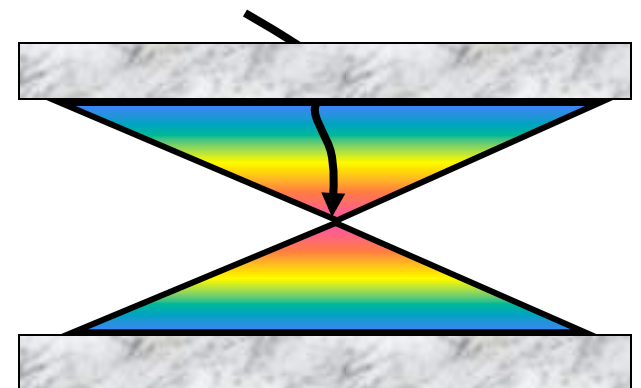
# Analog Platforms

- An Analog Platform is a library of analog components and interconnects that implements a set of functionalities
- An Analog Platform consists of:
  - *Behavioral models* provide an efficient way to simulate mapping effects at the current platform level
  - *Performance models* constrain the possible behaviors to the considered platforms



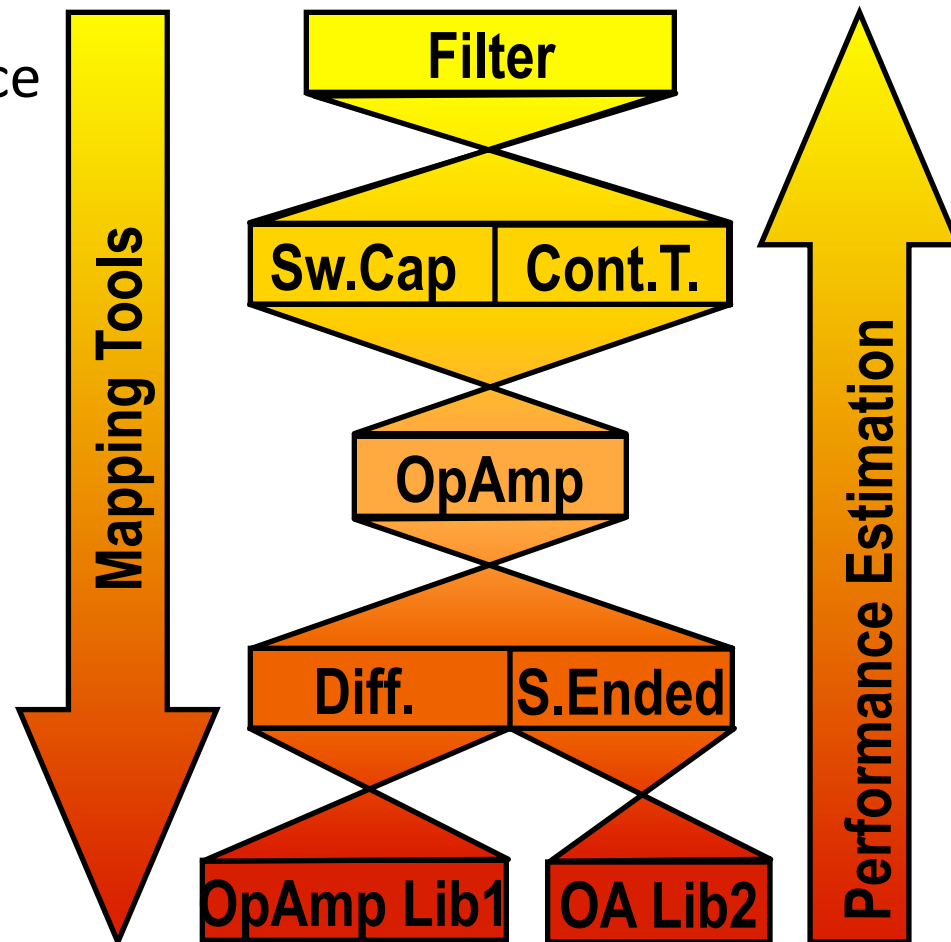
# Analog Platforms (cont.)

- Classic top-down approaches suffer for limited predictability of performances → Introduce a new level of abstraction
- Platforms abstract underlying components providing:
  - Estimation mechanisms (i.e. models) for platform level optimization
  - Mapping mechanisms to propagate constraints to next level
- Platforms provide accurate exploration mechanisms by limiting the search space
- Platforms may encapsulate synthesis paths



# Analog Platform Stacks

- APs allow efficient top-down flows for analog systems
- At each level of abstraction in the platform stack, performance models allow transforming requirements into satisfiable next-level constraints
- Any platform instance is implementable by definition
- Platform stacks allow the selection of optimal architectures and topologies for analog components



# Introduzione alla Progettazione RF

- Basic of RFIC Design (Luca Fanucci)
- RF Circuit Simulation

# Sommario

- Richiami analisi disponibili in SPICE
- Caratteristiche circuiti RF
  - Impraticabilità uso analisi SPICE per la valutazione di alcuni parametri di interesse dei circuiti RF
- Analisi per soluzione in regime periodico (o quasi-periodico)
  - Harmonic Balance, Shooting method
- Estensioni delle analisi per soluzione regime periodico (o quasi-periodico)

# Richiami analisi SPICE

- 3 classi principali di analisi:

| Tipo analisi | Applicazione          | Modello                                                                                 |
|--------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| DC           | Punto di riposo       | Eq. non lineari in continua                                                             |
| AC           | Risposta in frequenza | Eq. lineari (o linearizzate nel p.to di lavoro in continua) nel dominio della frequenza |
| TRAN         | Analisi transitorio   | Eq. non lineari integro-differenziali                                                   |

# SPICE: analisi AC (1)

- Analisi fasoriale (regime sinusoidale)
- BCE (Branch Constitutive Equation)  
corrispondono ad ammettenze complesse  
dipendenti dalla frequenza

$$Y = G + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}$$

- Applicata a circuiti non lineari è valida solo per piccoli segnali variabili intorno al p.to di riposo in continua

# SPICE: analisi AC (2)

- Oltre alla risposta in frequenza, l'analisi AC può valutare rumore (NOISE)
- Sono inseriti generatori (incorrelati) rumore dispositivi: *termico*, *shot*, *flicker*, *burst*.
- Analisi NOISE valuta valore quadratico medio della tensione  $v_{no}$  della porta di uscita:

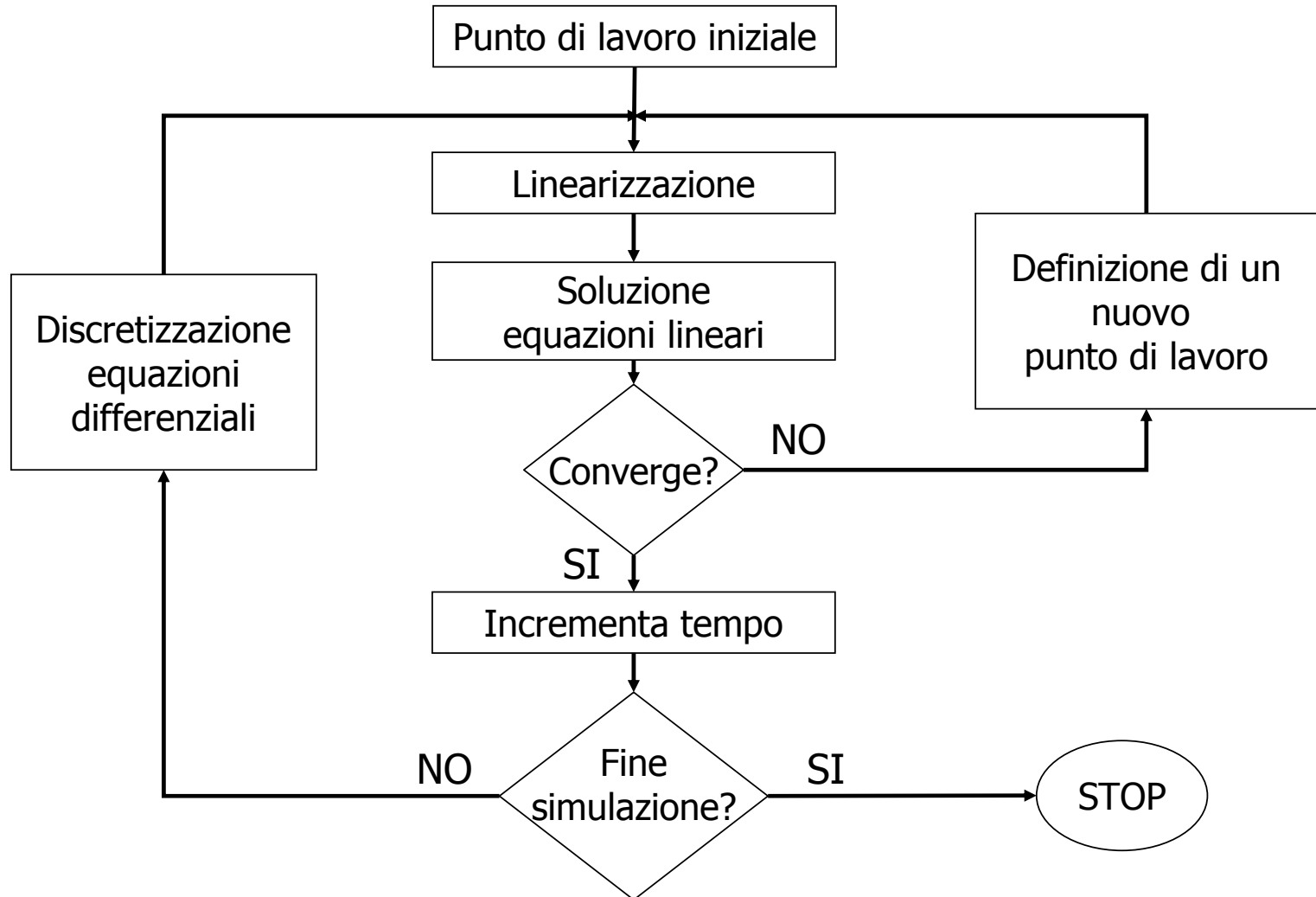
$$\overline{v_{no}^2} = \sum_{k=1}^N |Z_k|^2 \overline{i_{nk}^2}$$



# Analisi TRAN (1)

- Può essere applicata a un qualunque circuito sollecitato da segnali generici
- Il p.to di riposo in DC è normalmente usato come condizione iniziale
- Il passo di integrazione è determinato dal segnale più veloce, mentre il tempo di simulazione da quello più lento

# Analisi TRAN (2)

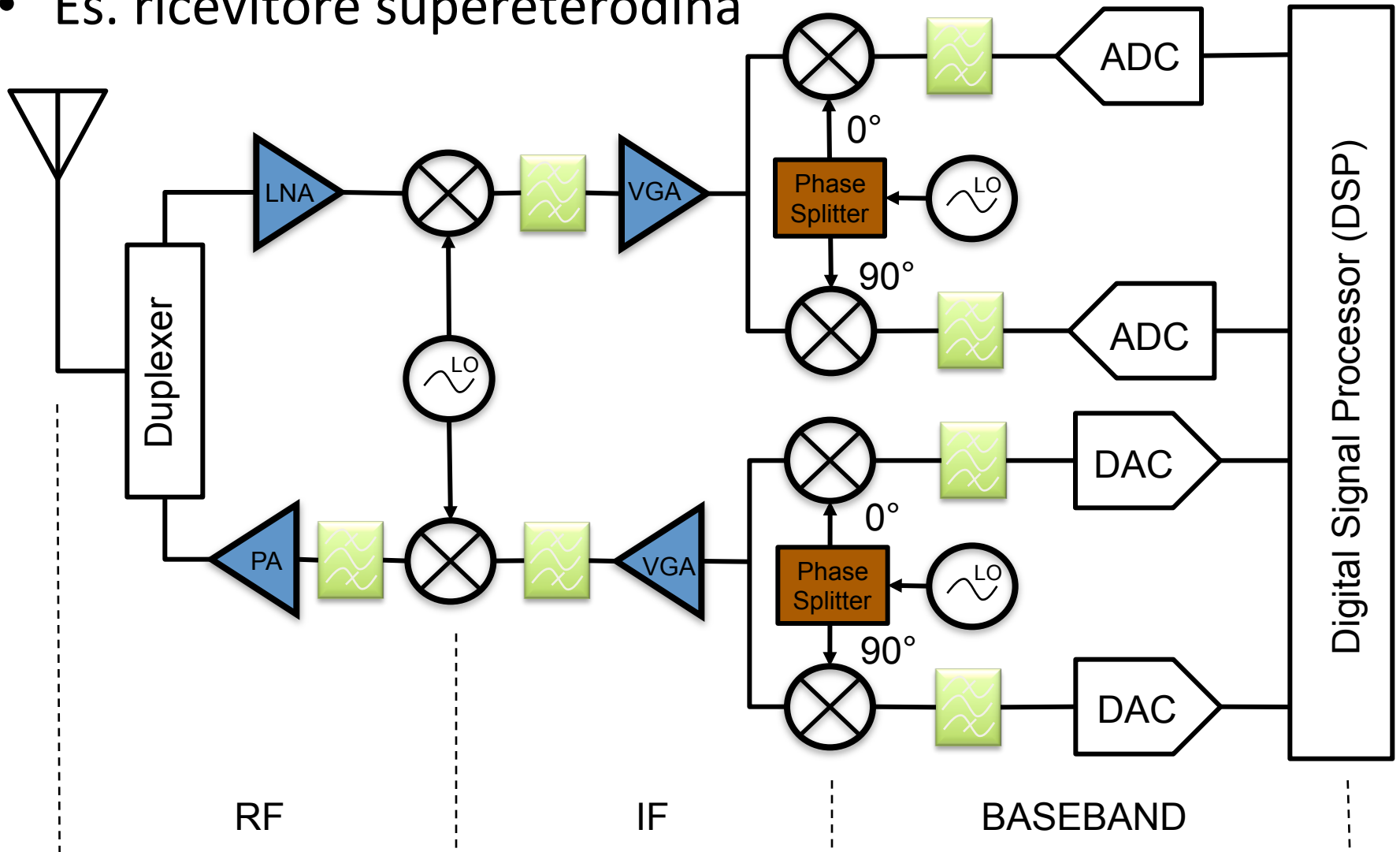


# Analisi TRAN (3)

- Può valutare trasformata discreta Fourier (FOUR) su ultimo periodo dell' intervallo di simulazione
  - Richiede che il tempo di simulazione sia maggiore del transitorio affinché il circuito sia a regime periodico
- Può diventare impraticabile (simulazioni molto lunghe) in base alle caratteristiche dei segnali presenti

# Blocchi principi RF

- Es. ricevitore supereterodina

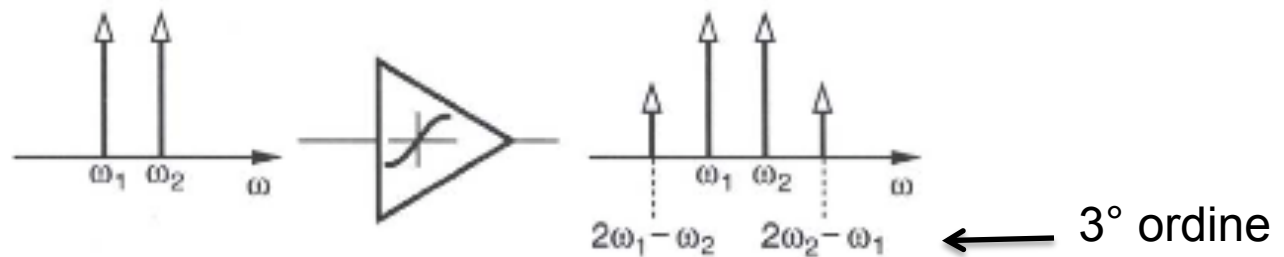


# Caratteristiche blocchi RF (1)

- Bassi segnali in ingresso al ricevitore (fino a 1  $\mu\text{V}$ )
- Sensibilità ricevitore determinata dal rumore del front-end: LNA, Mixer, LO
  - Simulazione rumore LNA (cifra di rumore) ok con analisi AC
  - Simulazione rumore Mixer e LO (jitter/rumore di fase) impossibile con analisi AC, in quanto il punto di riposo del circuito varia nel tempo

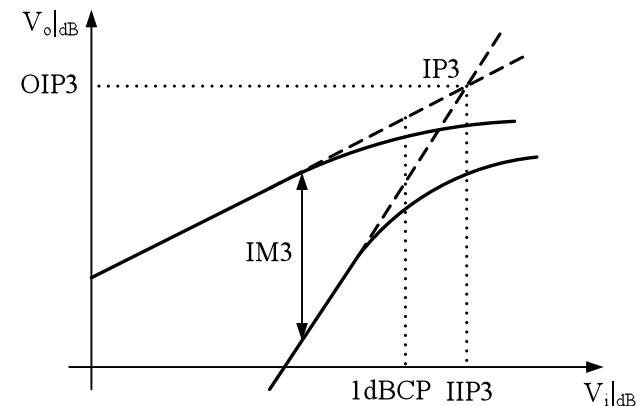
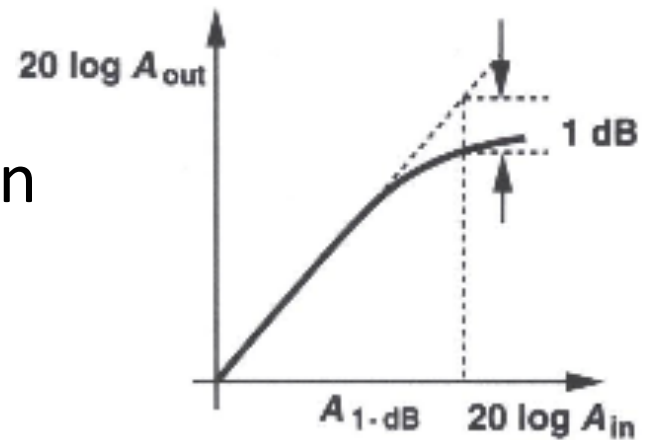
# Caratteristiche blocchi RF (2)

- Ampia dinamica segnali in ingresso al ricevitore:
  - Distanza dalla stazione trasmittente
  - Presenza elevati interferenti su canali adiacenti
- Importante verificare linearità ricevitore:
  - Ingresso due sinusoidi in banda con frequenza vicina
  - Prodotti di intermodulazione nella banda del ricevitore (IMD InterModulation Distortion)



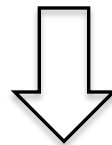
# Caratteristiche blocchi RF (3)

- Parametri di non linearità:
  - P.to di compressione a 1 dB  
(si varia ampiezza sinusoide in ingresso)
  - Blocco del guadagno  
(si varia ampiezza dell'interferente)
  - Prodotti di intermodulazione, intercetta del 3° ordine (IP3)  
(si varia ampiezza delle due sinusoidi in ingresso)



# Caratteristiche blocchi RF (4)

- Segnali con frequenze molto diverse tra loro; es. portante e modulante
- Segnali con frequenze vicine (canali adiacenti o *down conversion* nel mixer) generano armoniche a frequenza molto più bassa



- Simulazione con analisi TRAN risulta impraticabile per misurare non linearità



# Analisi Periodic Steady-State (1)

- Stimoli circuiti RF costituiti da uno o più toni (grandi segnali) a frequenza diversa
- Idea: valutare soluzione regime permanente senza calcolare transitorio iniziale
- Soluzione di regime: periodica (fondamentale + armoniche relative al singolo ingresso periodico) o quasi-periodica (fondamentali + miscelazione armoniche relative ai diversi ingressi periodici)

# Analisi Periodic Steady-State (2)

- Analisi non-linearità:
  - Distorsioni
- Simulazione oscillatori (anche la frequenza di oscillazione è un'incognita!)
- Due algoritmi principali:
  - nel tempo: Shooting method (CAD: SpectreRF)
  - in frequenza (misto): Harmonic Balance (CAD: ADS)

# Shooting method (1)

- Si basa su analisi transitorio imponendo vincolo che soluzione sia periodica:

$$v(t_0 + T) = v(t_0), \quad v(t_0) \text{ incognito e } T \text{ noto}$$

- $v(t_0)$  (valore iniziale) viene determinato con metodo iterativo (Newton)
- Analisi transitoria su un periodo  $T$ , combinata con analisi sensibilità per determinare  $v(t_0)$  al passo successivo

# Shooting method (2)

- Analisi oscillatori (Autonomous Shooting method): il periodo  $T$  è un'ulteriore incognita; deve essere aggiunta un'altra equazione
- Può essere applicato anche al caso di soluzioni quasi-periodiche
- Lavorando nel dominio nel tempo, risulta poco adatto a simulare componenti naturalmente descritti nel dominio della frequenza

# Harmonic Balance (1)

- Idea: sviluppo soluzione in serie di Fourier (singolo tono) o Fourier generalizzato (più toni)
- Es. con due toni  $f_1$  e  $f_2$ :
$$v(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} V_{kl} e^{j2\pi(kf_1 + lf_2)t}$$
- Le incognite sono i coefficienti  $V_{kl}$  dello sviluppo in serie di Fourier
- Perché metodo sia praticabile, lo sviluppo in serie di Fourier deve essere troncato ( $k$  e  $l$  limitati)

# Harmonic Balance (2)

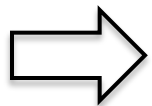
- Sistema eq. ai nodi (conduttanze e capacità non lineari e gen. di corrente  $u(t)$  periodici  $T$ )

$$f(v(t), t) = i(v(t)) + \dot{q}(v(t)) + u(t) = 0 \quad v(t) \in \Re^n$$

- Sol. regime periodico:  $v(t) = \sum_{k=-N}^N V_k e^{j2\pi kft}$  ;  $f = 1/T$   
( $N$  limitato)

- Il sistema da risolvere: 
$$\sum_{k=-N}^N F_k(V) e^{j2\pi kft} = 0$$

- Armoniche linearmente indipendenti



$$F_k(V) = j2\pi kfQ_k(V) + I_k(V) + U_k = 0 \quad -N \leq k \leq N$$

# Harmonic Balance (3)

- Gli elementi non lineari modellati dominio nel tempo
- Necessario antitrasformare  $V$  (termini  $i$  e  $q$  non lineari valutati nel dominio del tempo) e poi ritrasformare  $i$  e  $q$  nel dominio della frequenza
- Vantaggio: i componenti sono modellati nel loro dominio più consono
- Risulta abbastanza complessa, soprattutto nel caso di più toni; problemi a convergere

# Harmonic Balance (4)

- Può essere usata per analizzare oscillatori (Autonomous Harmonic Balance)
  - Il periodo  $T$  diventa un'ulteriore incognita
  - Serve un'ulteriore equazione
    - Non essendoci segnali esterni, la fase di una delle armoniche può essere fissata arbitrariamente
  - Serve un accorgimento per evitare che la soluzione “banale” uguale a 0
    - Si può normalizzare funzione errore con la norma del vettore delle tensioni



# Estensioni analisi steady-state

- Analisi Periodic Steady-State risolvono problema misura parametri di distorsione
- Sono la base per altre analisi che coprono la valutazione del rumore negli oscillatori e mixer e l'analisi di circuiti con segnali arbitrariamente modulati
  - Small-Signal AC analysis
  - Transient-Envelope

# Riferimenti

- K. S. Kundert, “Introduction to RF Simulation and Its Application,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 9, pp. 1298-1319, Sep. 1999