

Sistemi elettronici e sensori a microonde per indagini sub-superficiali

PhD research activity overview and results

Ing. Filippo Micheletti

Filippo Micheletti,

laureato in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Firenze e della Scuola di Dottorato in Ingegneria e Scienza dell'informazione dell'Università di Siena. Assegnista presso l'Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara” (CNR-IFAC) di Sesto Fiorentino.



✉ f.micheletti@ifac.cnr.it

☎ 0555226445

📄 IFAC – CNR

Via Madonna del Piano, 10

50019, Sesto Fiorentino (FI)

Link presentazione: www.filippomicheletti.it/teach/esas

La mia attività di dottorato

- Progetto di ricerca su sensori e sistemi a microonde per la spettroscopia dielettrica
- Attività svolta in IFAC-CNR prevalentemente nei laboratori di Spettroscopia Dielettrica (Dott. Olmi) e di Spettroscopia Applicata (Dott. Picollo) sotto la supervisione del Prof. Capineri
- Principali attività svolte:
 - Progettazione elettronica a microonde
 - Sviluppo di firmware e software per sistemi di misura a microonde
 - Sviluppi di software per la gestione ed elaborazione di immagini iperspettrali

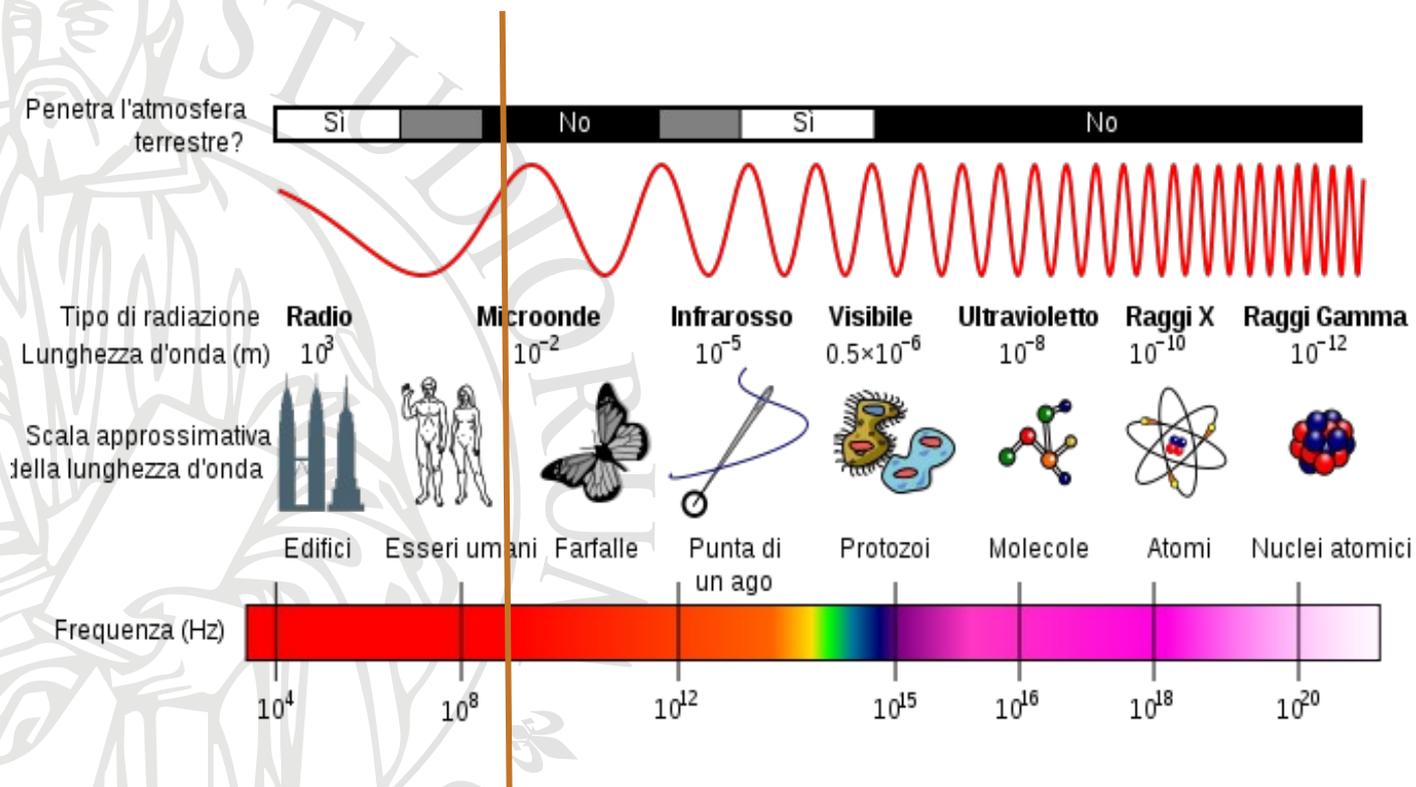
La mia attività di dottorato

- Contesti applicativi
 - Progetto iniziale orientato allo studio delle proprietà di terreni e neve
 - Diagnostica nel settore dei beni culturali
 - Applicazioni industriali (legno e materiali edilizia)

Outline

- Principi di microscopia a microonde e spettroscopia dielettrica
- SUSI
- Scanner a microonde
- SFCW GPR

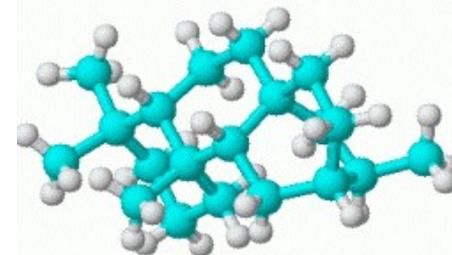
Microscopia a microonde



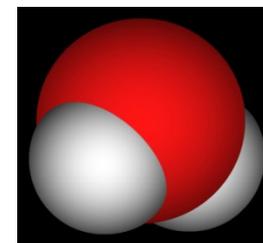
Dielettrometria a microonde

TECNICA: EFD (evanescent field dielectrometry)

Le proprietà dielettriche di un materiale sono legate alla struttura molecolare



L'acqua è **fortemente** polare.
Intonaco, mattoni e pietra sono **debolmente** polari



Il contrasto dielettrico tra l'acqua ($\epsilon' \sim 80$) e i materiali costituenti l'affresco ($\epsilon' \sim 2 \div 5$) consente di rivelare la presenza di umidità anche di modesta entità

Stato dell'arte misura umidità

Termografia

Vantaggi:

- Rapida, risultati in tempo reale
- Immagini
- Abbastanza economica

Svantaggi

- Non quantitativa
- Si presta a false interpretazioni

La termografia è attualmente molto utilizzata soprattutto in campo architettonico/civile (certificazioni, perizie, ecc), ma anche nella conservazione dei beni culturali.



Stato dell'arte misura umidità

Metodo gravimetrico

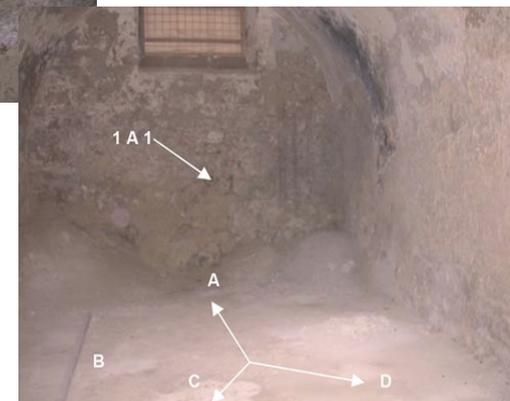
Vantaggi:

- Misure molto accurate
- Non richiede particolare strumentazione

Svantaggi

- Estremamente invasivo e distruttivo
- Misure puntuali
- Si presta a false interpretazioni

Il metodo gravimetrico è attualmente (e incredibilmente) il metodo più usato soprattutto nel settore della conservazione dei beni culturali



Obiettivi diagnostici

Indagini sullo stato di salute di un affresco

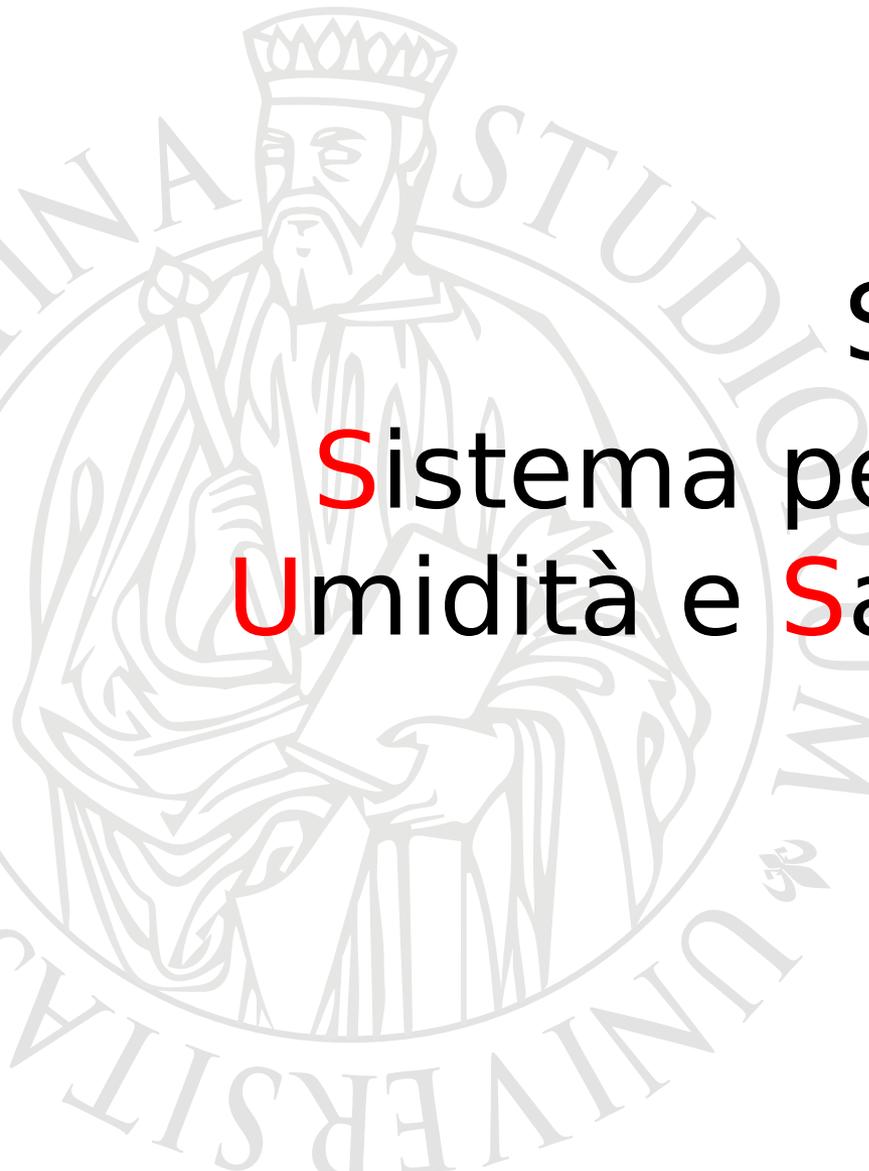
- Monitoraggio del contenuto di umidità e di sali sulla parete affrescata/dipinta
- Variazioni stagionali di umidità e sali
- Correlazione con parametri ambientali (umidità relativa, temperatura)
- Quantificazione termo-visione

Supporto agli interventi conservativi

- Analisi della dinamica di assorbimento/evaporazione dell'acqua nelle pareti
- Determinazione quantitativa dei sali estratti

Vantaggi

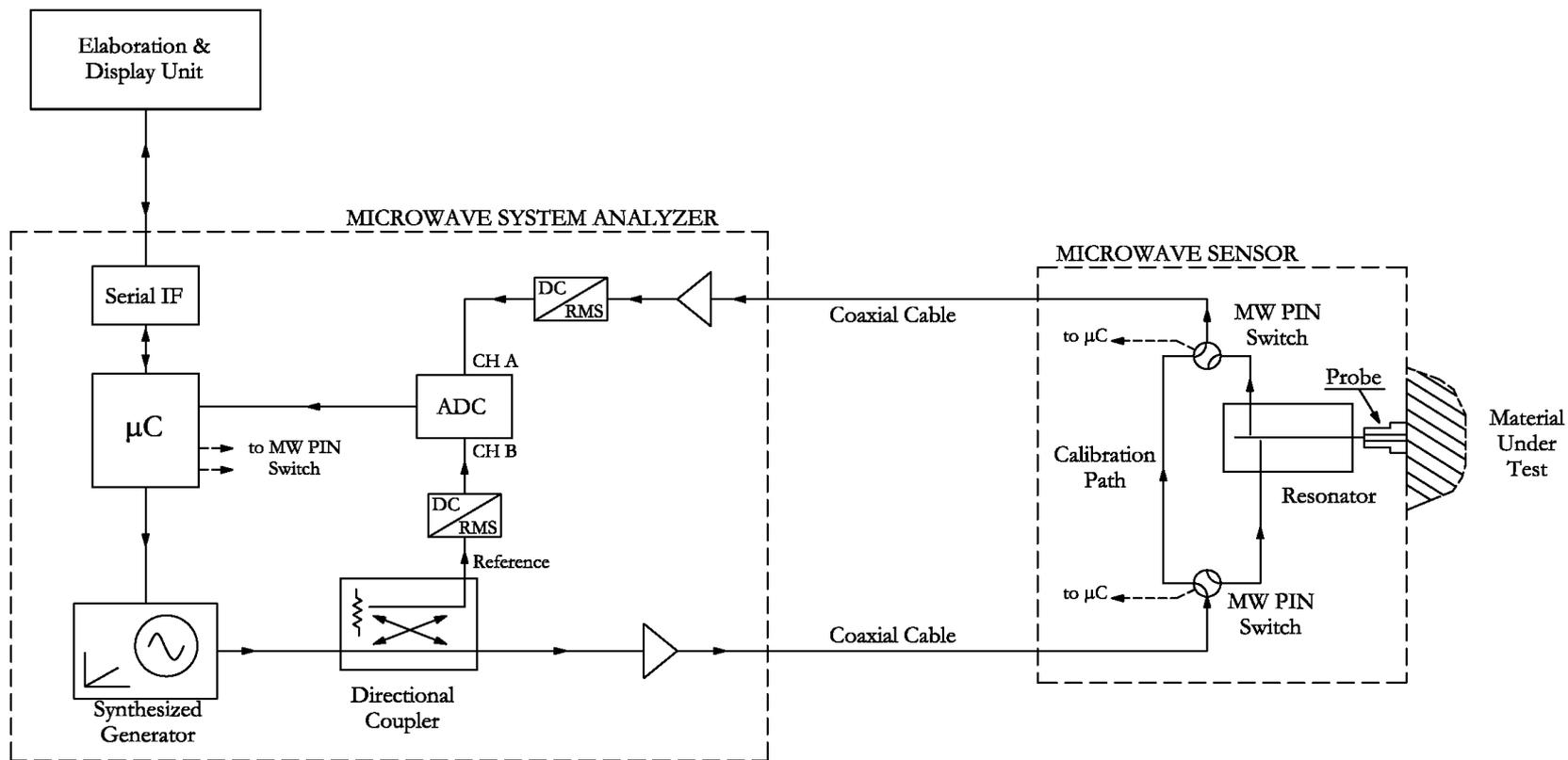
- Metodo di misura non invasivo e non distruttivo
- Misure rapide, ripetibili e risultati in tempo reale
- Basso costo



SUSI

Sistema per la misura di
Umidità e **S**alinità **I**ntegrato

Schema a blocchi



Brevetti: Italia-2004, UE -2005, USA -2009

PREMIO VESPUCCI 2006 "Miglior brevetto Toscano"

Caratteristiche tecniche

- Frequenza operativa: 1 – 1.5 GHz
- Volume investigato: semisfera 4 cm diametro
- Gamma MC (contenuto di umidità): 0% – 20%
- Misure a contatto diretto (non invasive)
- Analisi in tempo reale (~ 8 sec a misura)
- Testa di misura “customizzabile”



Base teorica

Studio della dinamica di diffusione dell'acqua in mezzi porosi **mediante spettroscopia dielettrica**

MODELLI

trasferimento di massa

modello elettromagnetico

modello accoppiato diffusione/dielettrico

Misura del contenuto di umidità (MC)

RAZIONALE

Lo *shift* della **frequenza di risonanza** $\Delta f_r = (f_0 - f)/f_0$ è legato alla quantità di acqua Ψ , e al **contrasto dielettrico** tra il materiale ospite (ad es. intonaco) e l'acqua

Δf_r è un parametro misurato direttamente

$$\Delta f_r(\Psi) = \alpha + \beta \Psi$$

Relazione tra Δf_r e MC

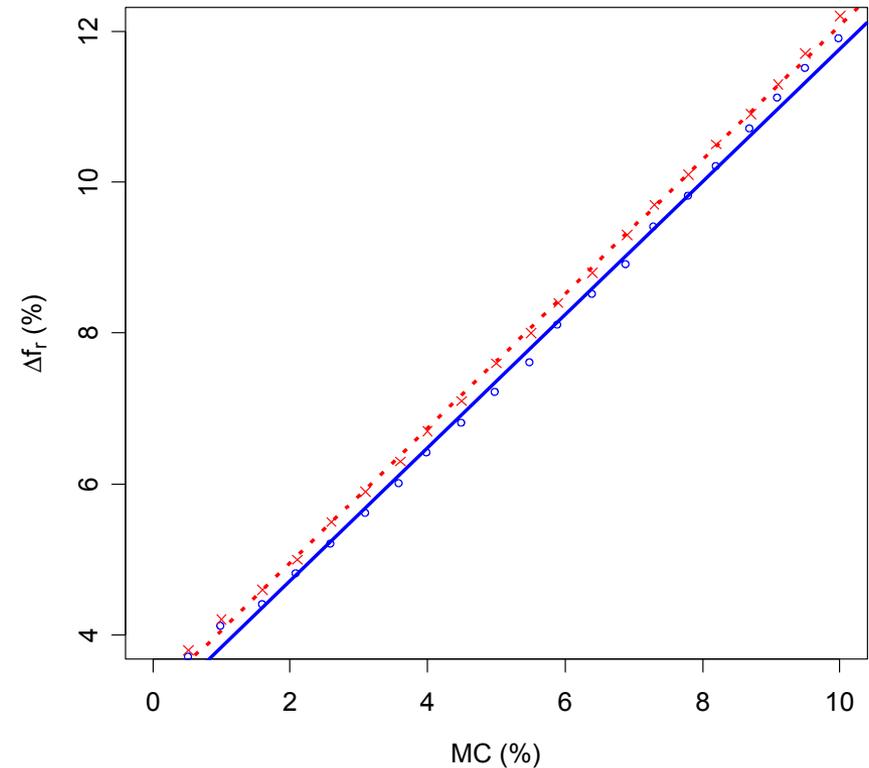
LEGENDA:

$$\sigma = 0.4 \text{ Sm}^{-1}$$

$$\sigma = 10 \text{ Sm}^{-1}$$

Acqua con bassa
concentrazione sali

Soluzione
2 moli/l
 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$



Misura dell'indice di salinità (SI)

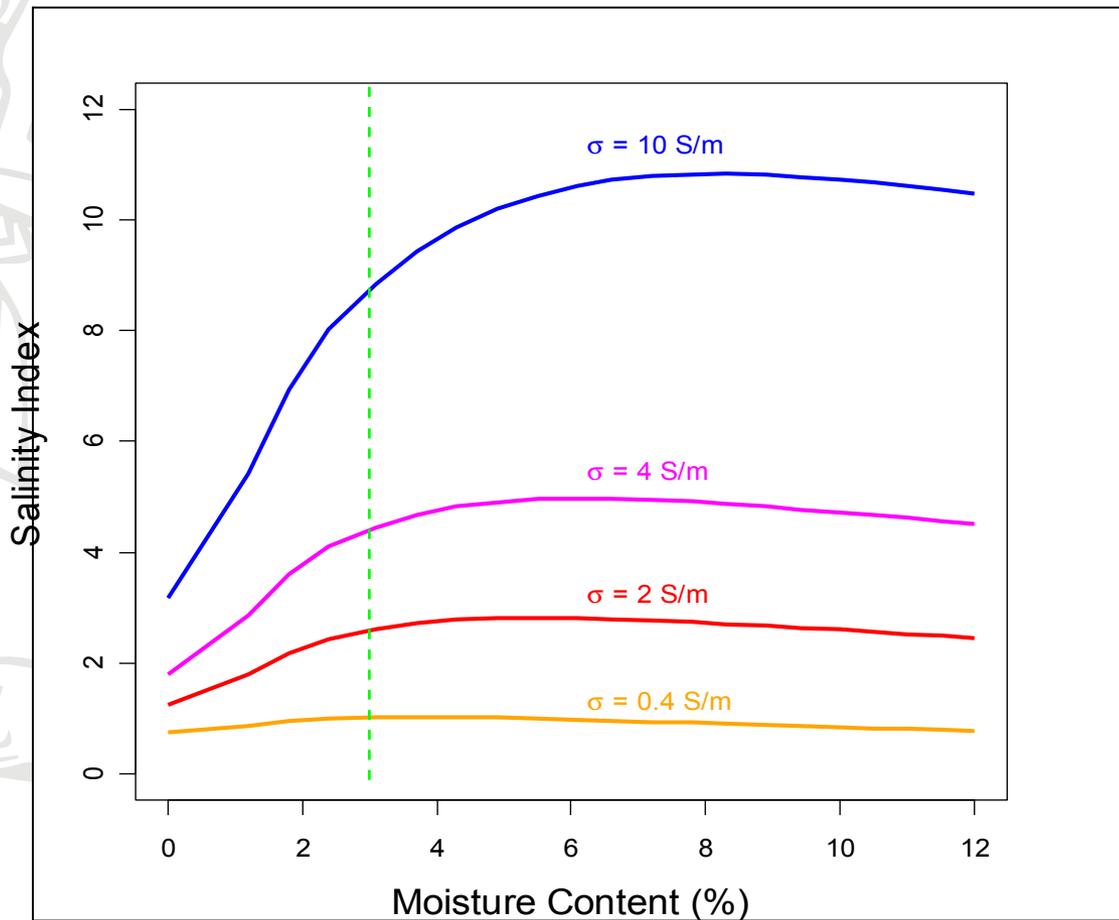
RAZIONALE

SI lega la **larghezza della riga** di risonanza (o il fattore di qualità Q del risonatore) con la **conducibilità elettrica** del materiale poroso

Q è un parametro misurato direttamente e indipendentemente da Δf_r

Definizione del Salinity Index (SI)

$$SI = \frac{1}{2} (\Delta f_r)^{-2} \frac{f_0}{f} \Delta \left(\frac{1}{Q} \right)$$



Procedure di misura

Resonance Frequency shift
Resonance Line Width

PRIMARIE



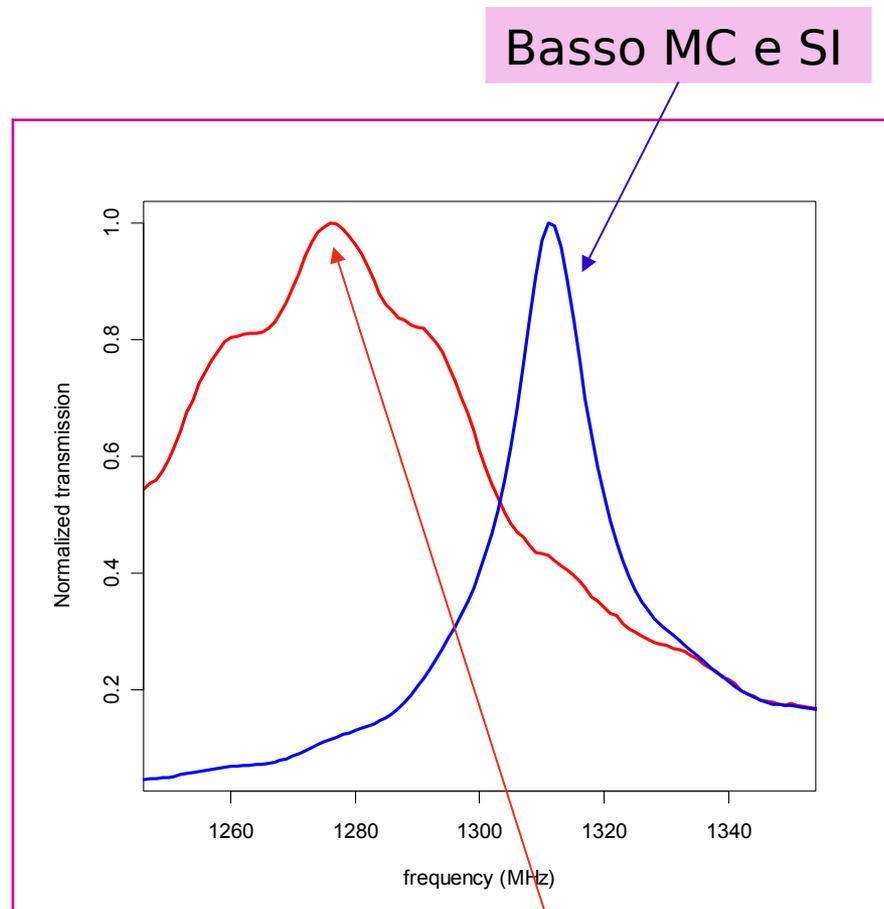
Dielectric Constant ϵ'
Dielectric Loss Factor ϵ''
Electric Conductivity σ

SECONDARIE



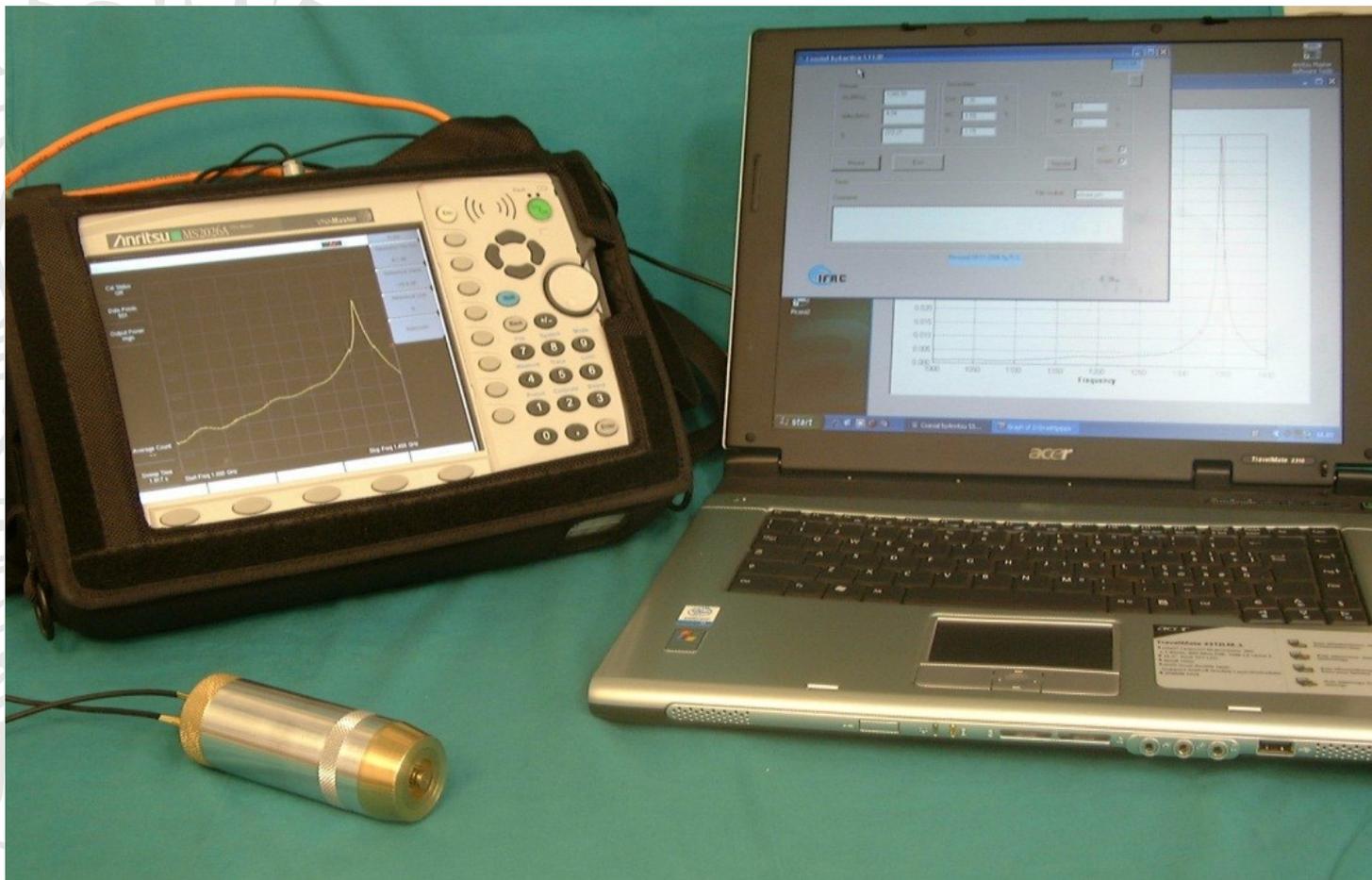
Moisture Content MC
Soluble salts Index SI

DIAGNOSTICHE

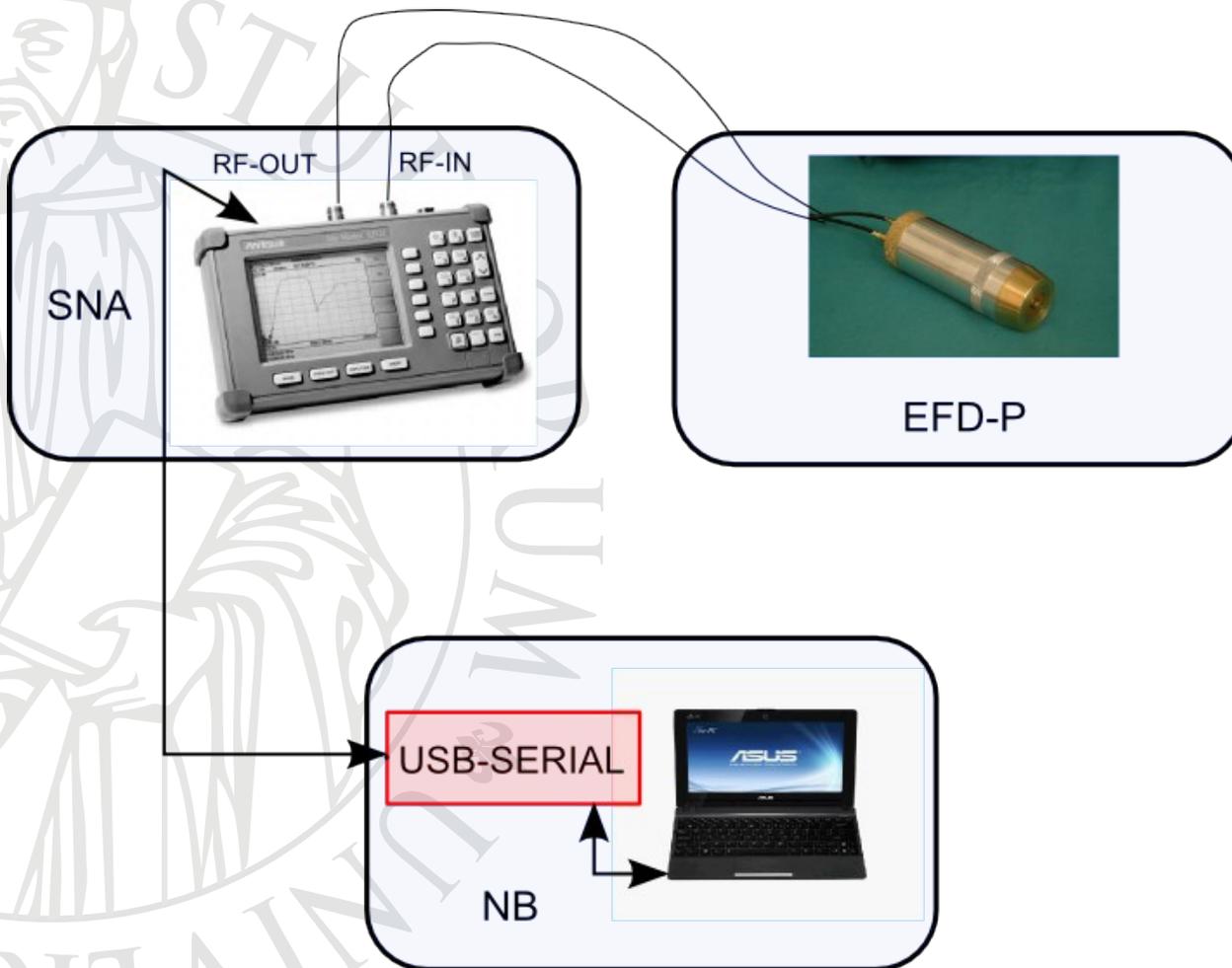


Alto MC e
SI

Sistema completo



Architettura

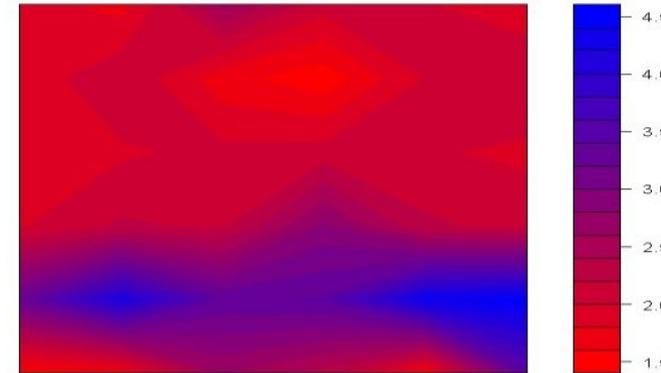
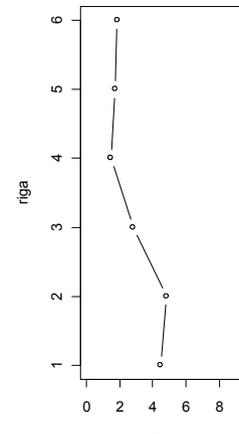
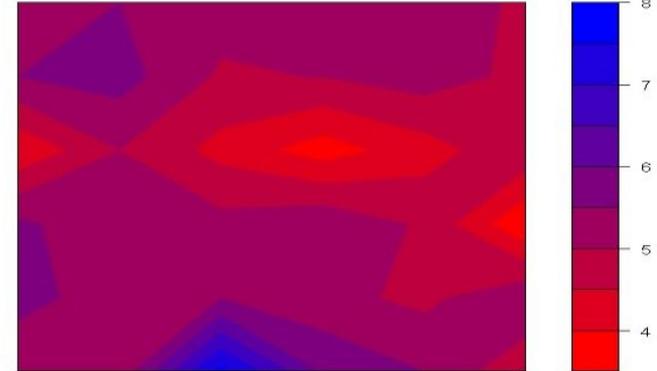
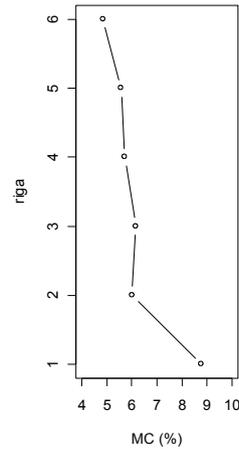


Esempi applicativi

- Chiostro di S. Antonino, San Marco (Firenze)
- Chiostro Verde, S. Maria Novella (Firenze)
- Cappella della Maddalena, Bargello (Firenze)
- Corridoio Stimate, La Verna (Arezzo)
- Chiesa di S. Croce (Firenze)
- Basilica di San Clemente (Roma)
- Loggetta Allori, Palazzo Pitti (Firenze)
- Tabernacolo di S. Caterina a Legoli (Pisa)
- Affresco Fecondità, Massa M.ma (Grosseto)
- Oratorio di Cornaredo (Milano)
- Cappella Zavattari, Duomo Monza
- Sala delle Asse – Cast. Sforzesco (Milano)
- Chiesa di S. Ignazio (Valtellina, Sondrio)
- Chiesa di Tolentino (Macerata)
- Sala del Capitolo, S. Marco (Firenze)
- Villa Reale (Monza)
- Basilica di S. Andrea (Mantova)
- Basilica di S. Fedele (Como)



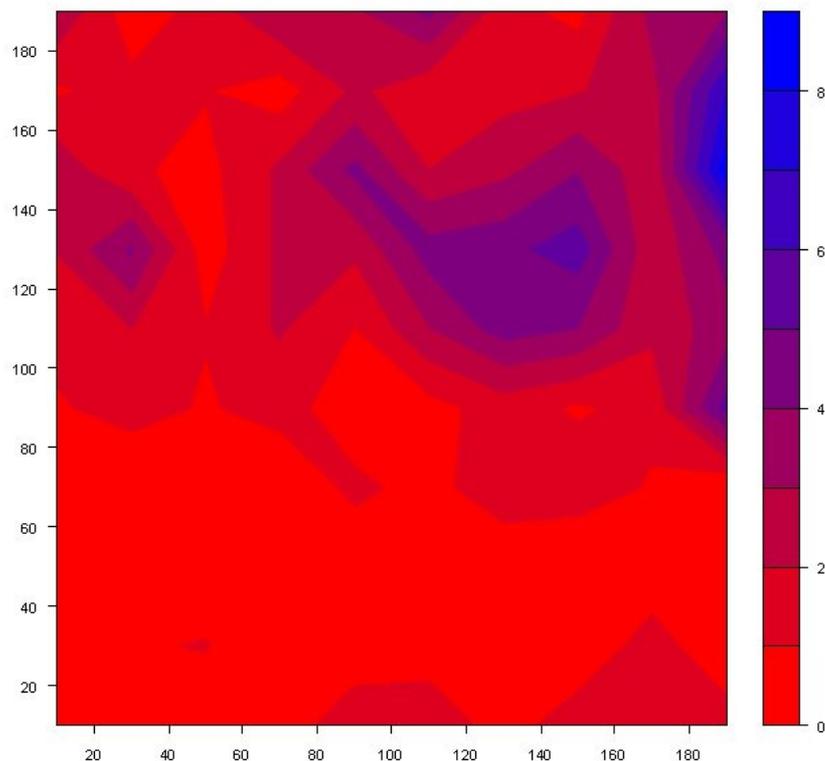
Mappe e profili MC e SI



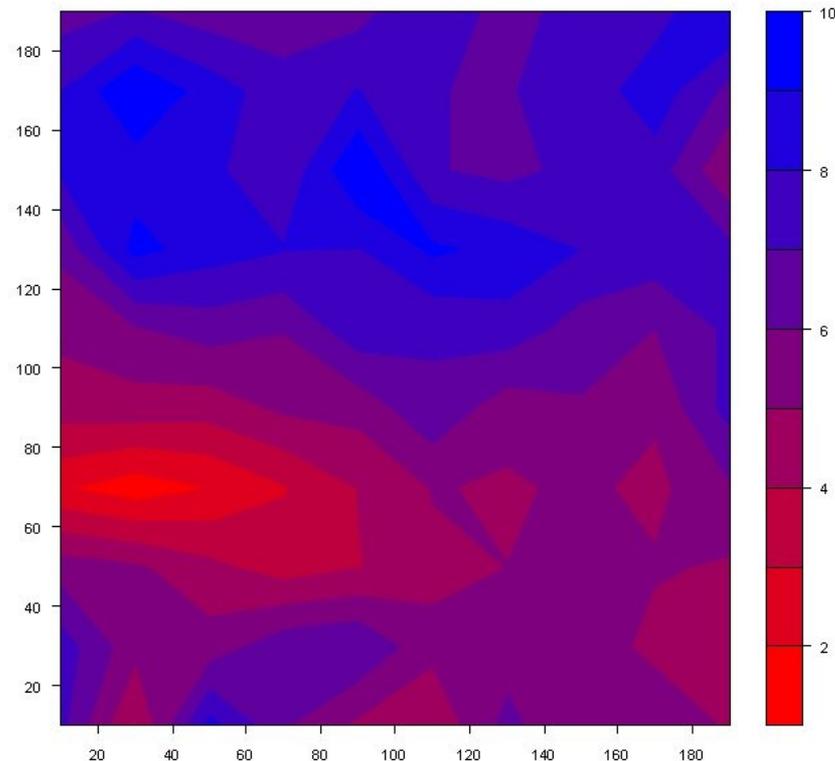
La leggenda di S. Alessio (Basilica di San Clemente, Roma)

Progetto ModihMA (MOisture detection in historic MAsonry)

Moisture Content (%)

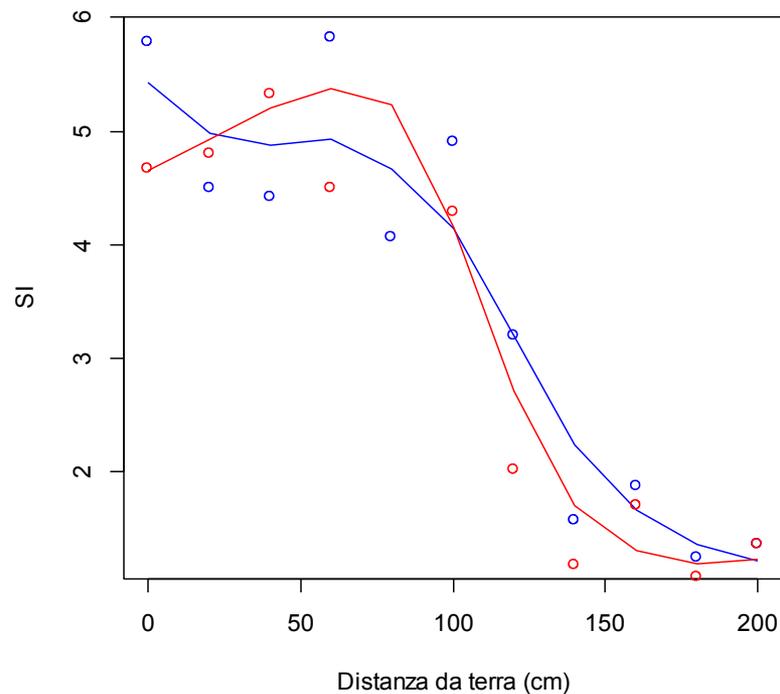
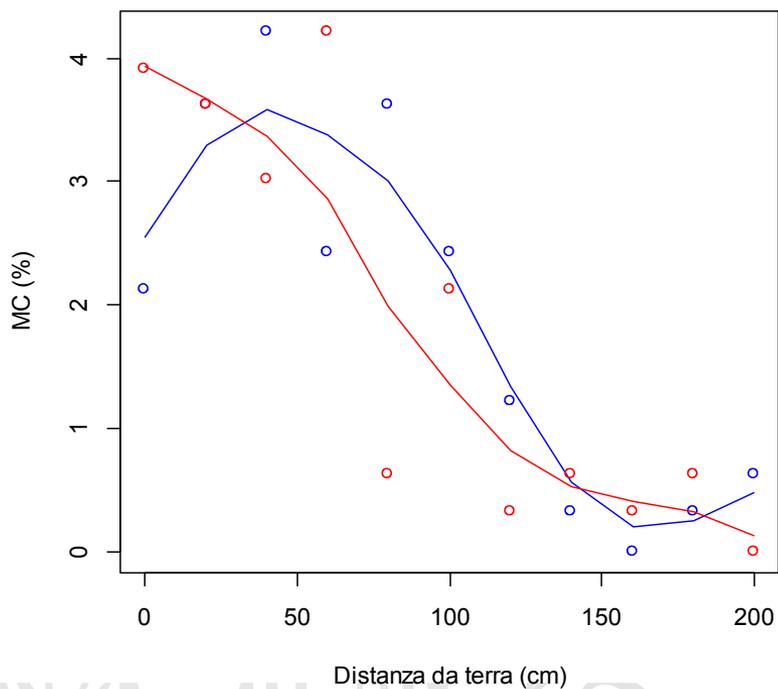


Salinity Index



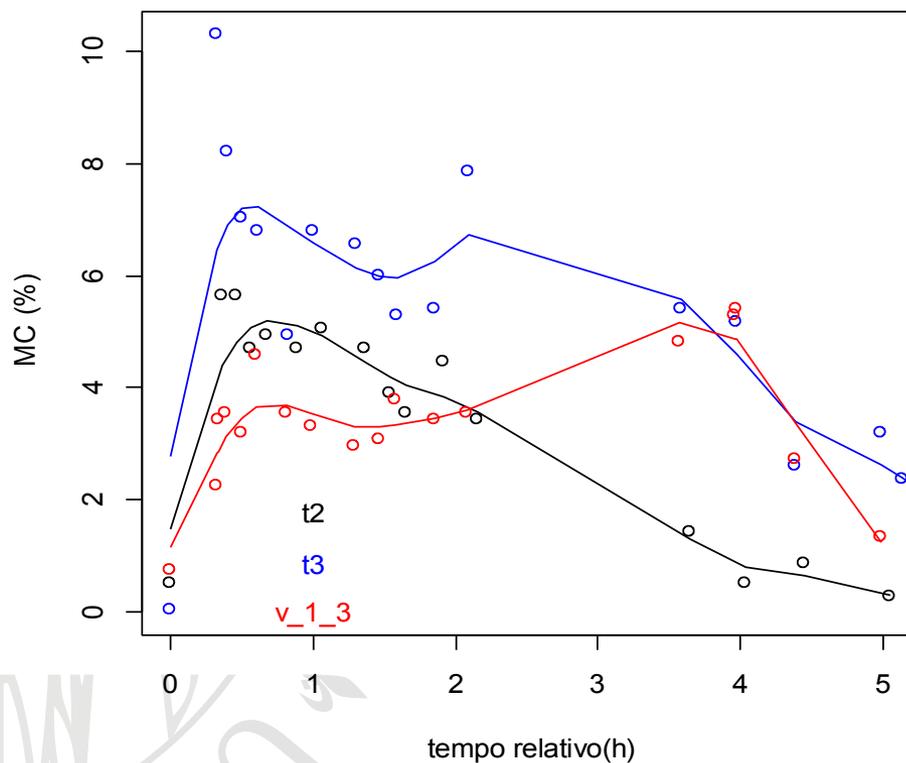
Cappella di S. Rocco (Cornaredo Milano)

Profili verticali MC e SI



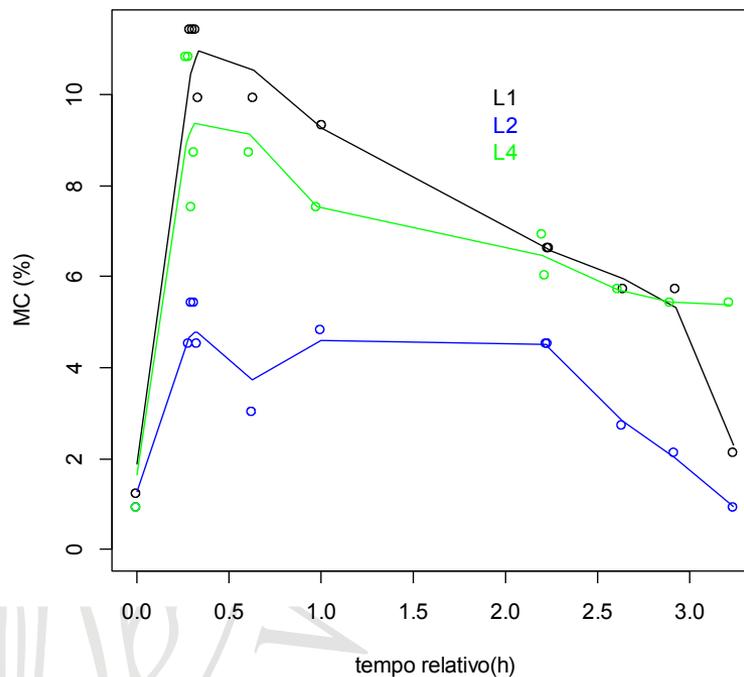
Basilica di S. Andrea (Mantova)

Dinamiche di assorbimento/evaporazione



Cappella Zavattari: influenza del tipo di trattamento sulla dinamica di assorbimento

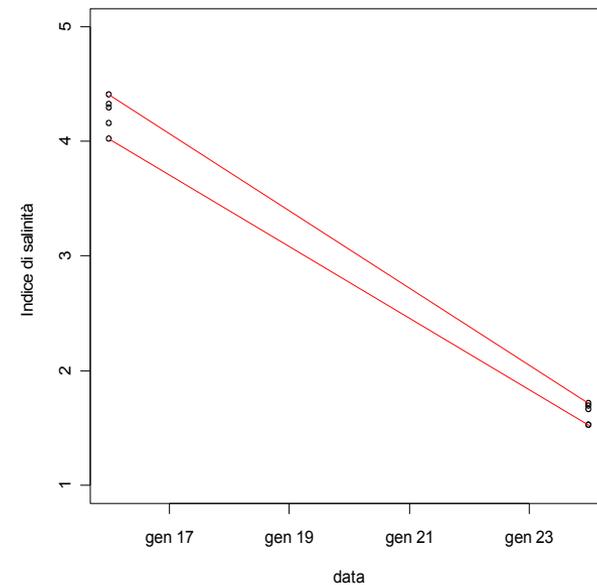
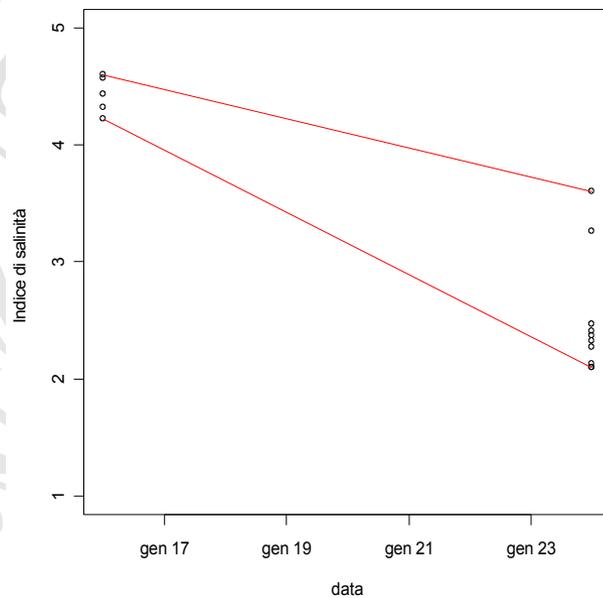
Dinamiche di assorbimento/evaporazione



Posizione	MC _{sp} (%)	MC ₀ (%)	MC _{2h} (%)
L1	10.2	11.4	6.6
L2	9.5	4.5	4.5
L4	12.4	10.8	6.0

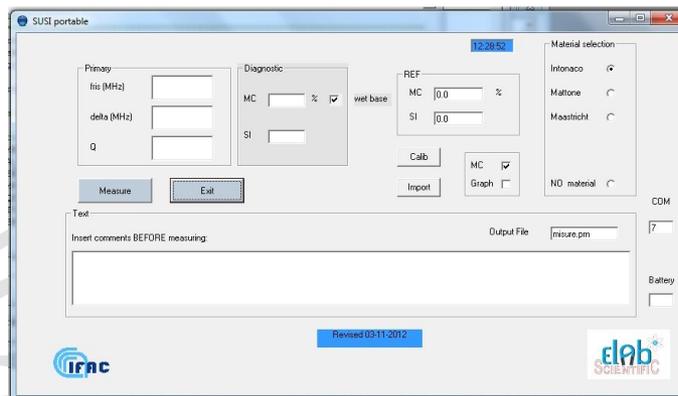
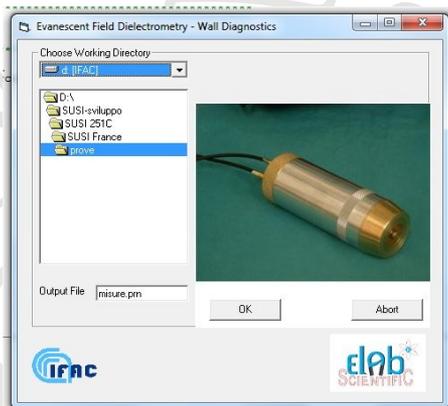
Cappella Zavattari: dinamica di assorbimento mediante bagnatura con spugnette

Verifica efficacia impacchi assorbenti



Loggetta dell'Allori, Pitti Palace, Firenze

Software di controllo



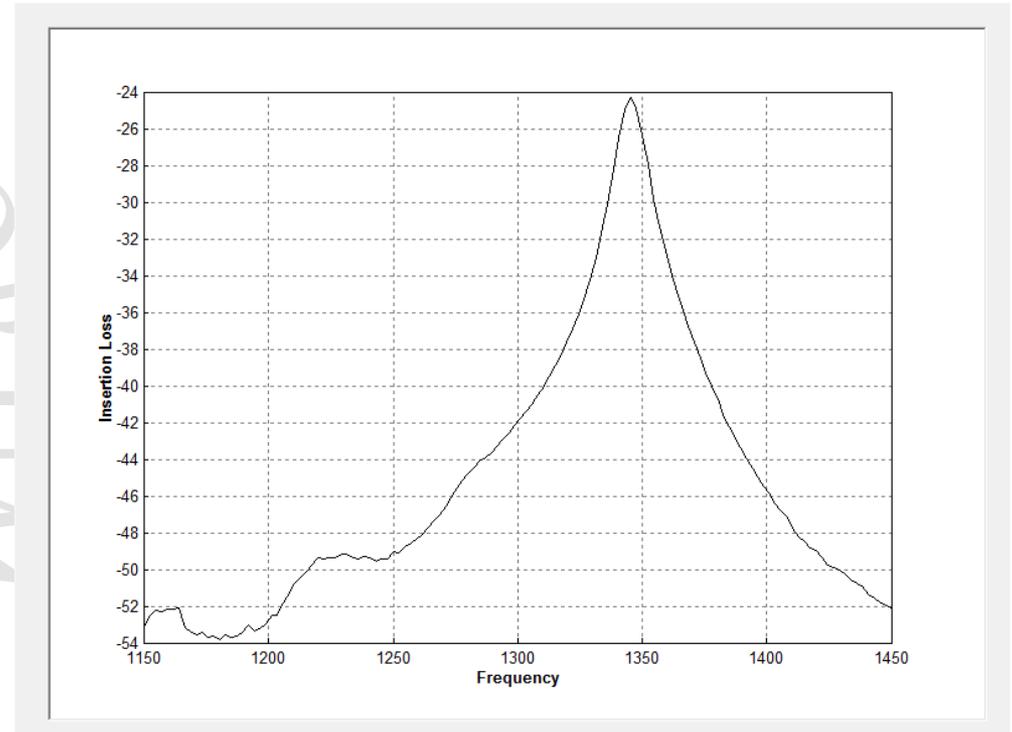
Pos	fres	Q	MC	SI	Comments	Time&Date
D:\test\c0.txt	1345.35			131.95	4.65	0.57 209.954 14/02/2013 19:11:19
D:\test\c1.txt	1345.35			115.19	4.65	0.81 210.420 15/02/2013 10:55:48
D:\test\c2.txt	1289.53			49.02	8.61 0.95	211.283 15/02/2013 11:06:38
D:\test\c3.txt	1277.91			59.27	9.43 0.60	211.876 15/02/2013 11:11:24
D:\test\c4.txt	1259.30			46.23	10.75 0.64	212.698 15/02/2013 11:14:22
D:\test\c5.txt	1252.33			43.55	11.25 0.63	213.741 15/02/2013 11:19:37
D:\test\c6.txt	1250.00			43.09	11.41 0.62	215.135 15/02/2013 11:31:29
D:\test\c7.txt	1240.70			33.92	12.07 0.74	217.846 15/02/2013 11:54:45
D:\test\c8.txt	1240.70			39.51	12.07 0.61	218.624 15/02/2013 12:04:47
D:\test\c9.txt	1240.70			35.41	12.07 0.70	222.487 15/02/2013 13:09:24
D:\test\c10.txt	1240.70			41.31	12.07 0.58	226.497 15/02/2013 15:13:35
D:\test\c11.txt	1238.37			43.89	12.23 0.52	232.809 15/02/2013 15:17:31

Dati

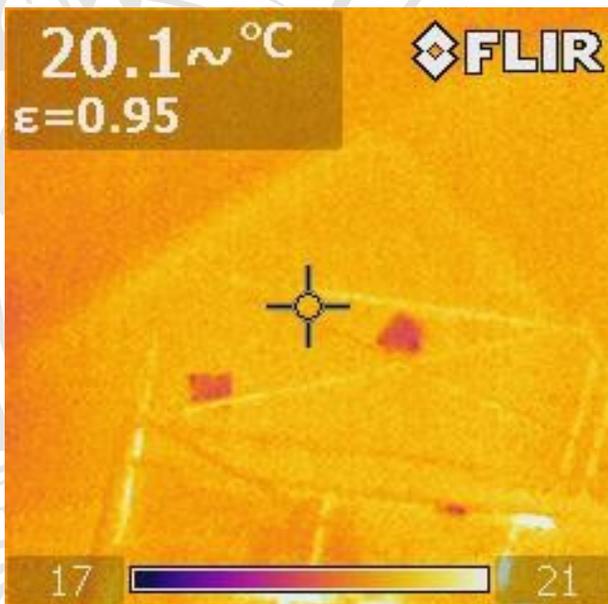
1150.000000000000	-53.1415451123173
1152.32558139535	-52.4496139500217
1154.6511627907	-52.197181151558
1156.97674418605	-52.2616374723183
1159.3023255814	-52.1436561572959
1161.62790697674	-52.1178861186181
1163.95348837209	-52.083182769733
1166.27906976744	-53.1079650970661
1168.60465116279	-53.3646433404693

.....

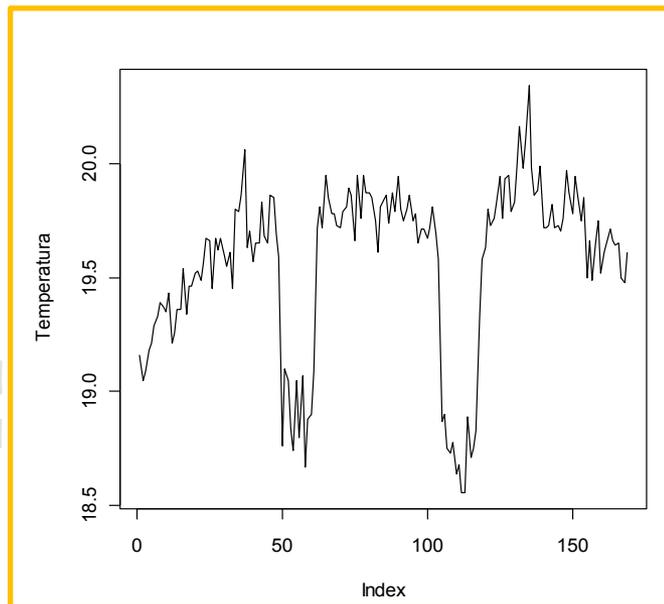
1440.6976744186	-51.3118401662352
1443.02325581395	-51.5502295831736
1445.3488372093	-51.752232289155
1447.67441860465	-51.9076419424001
1450.00000000000	-52.0351742708823



Sinergia con termografia

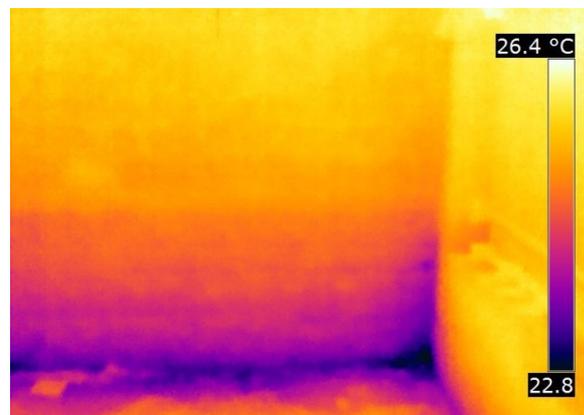
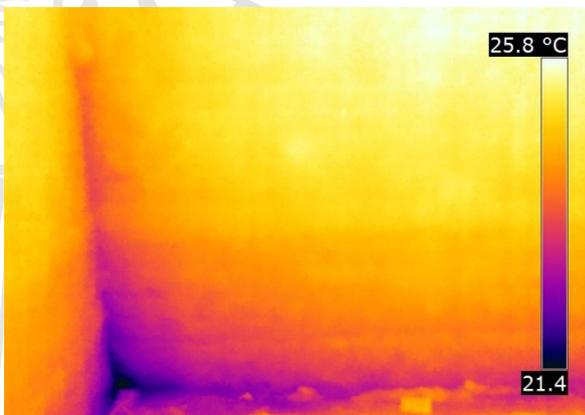


Misura termocamera
FLIR B60



Misura SUSI (MC=8.5%)

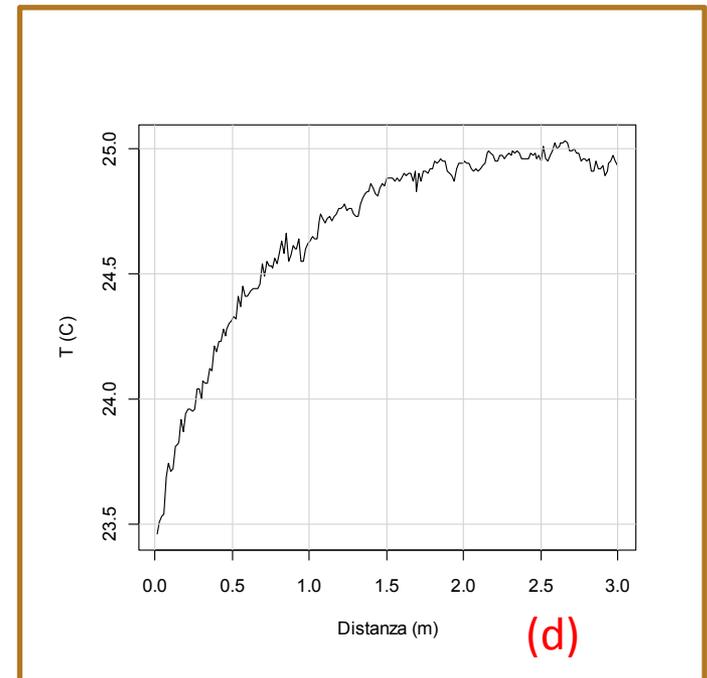
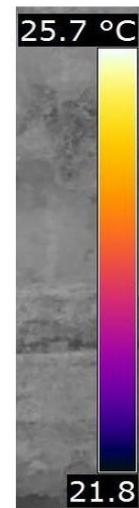
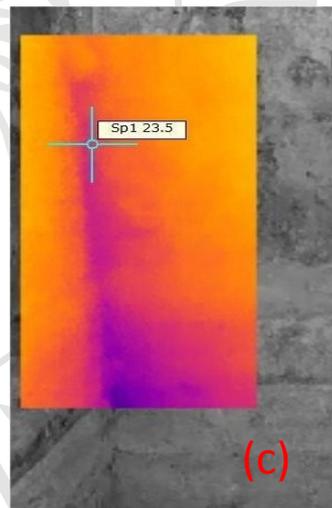
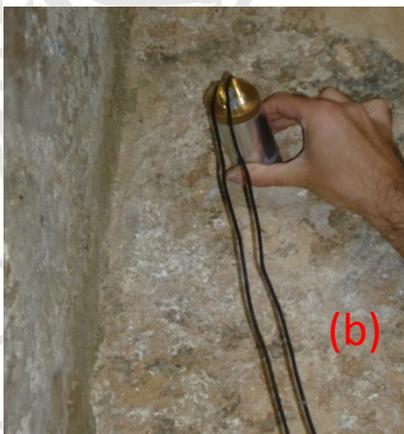
Sinergia con termografia



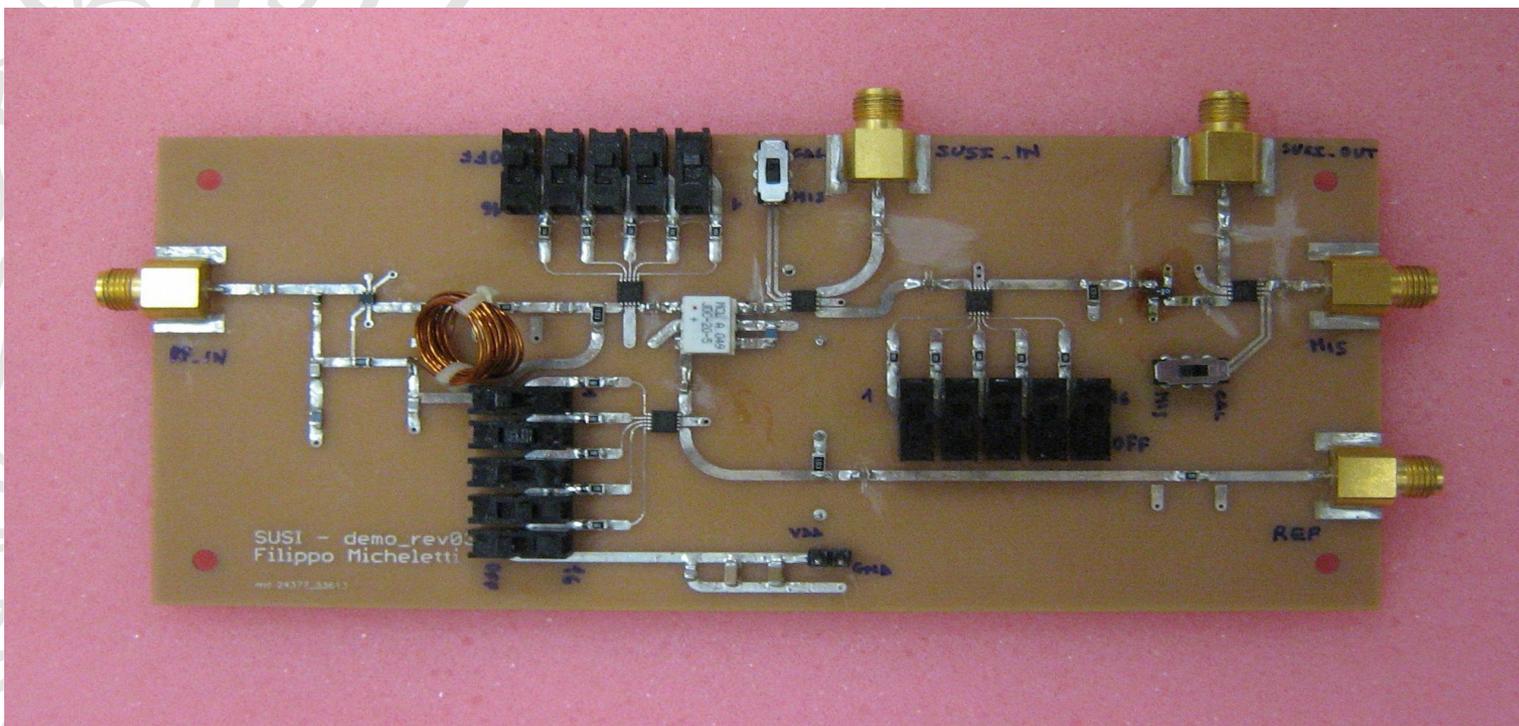
Fonte dell'Abbondanza- Massa Marittima (GR)

Termografia quantitativa

- punti di calibrazione SUSI (a,b);
- termografia della regione contenente i punti di calibrazione (c);
- andamento della temperatura su un asse orizzontale passante per i due punti (d).

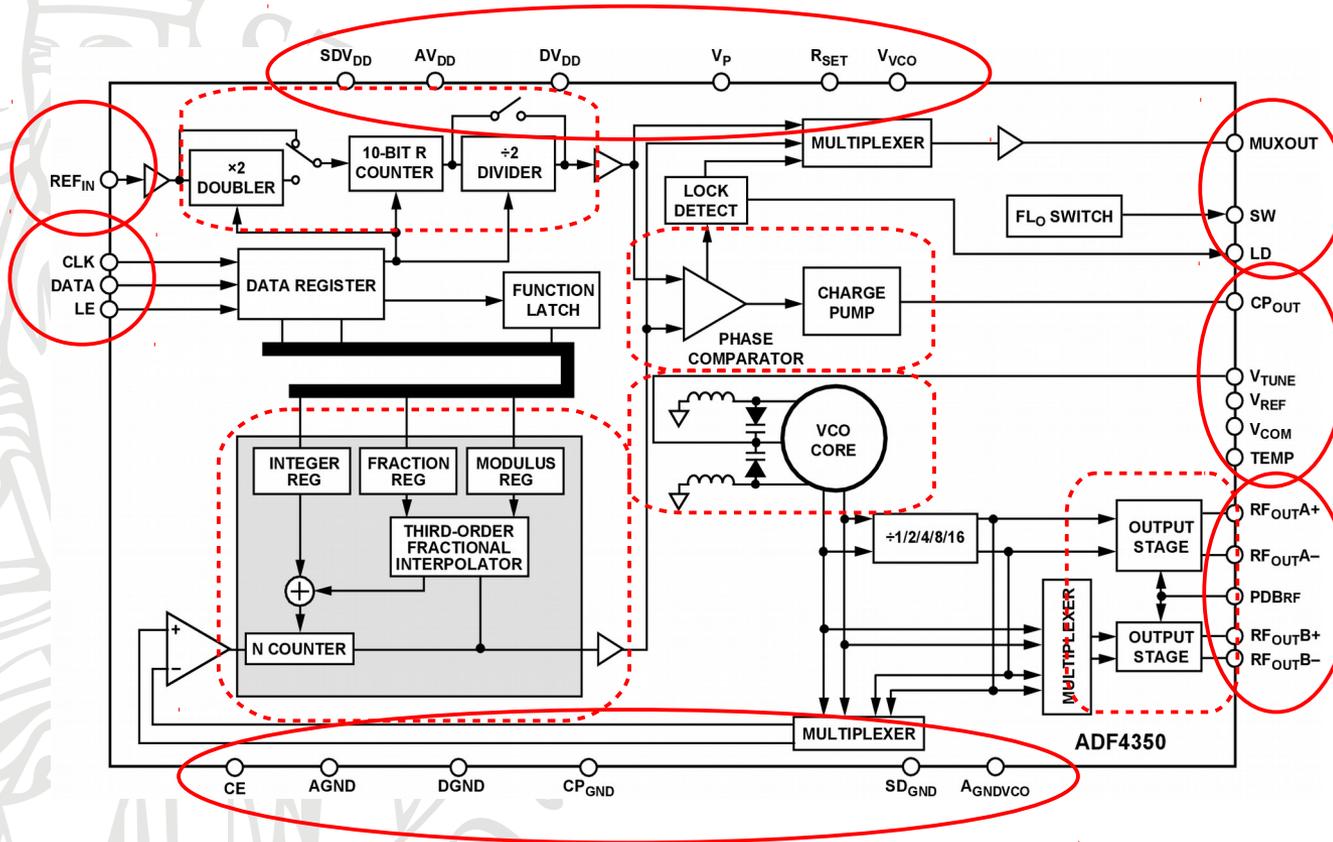


Integrazione su singola scheda



Prototipo della sezione RF realizzato durante l'attività di tesi specialistica

VCO+PLL integrato: ADF4350



ADF4350

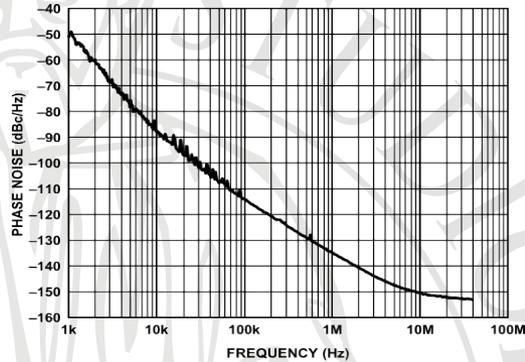


Figure 4. Open-Loop VCO Phase Noise, 2.2 GHz

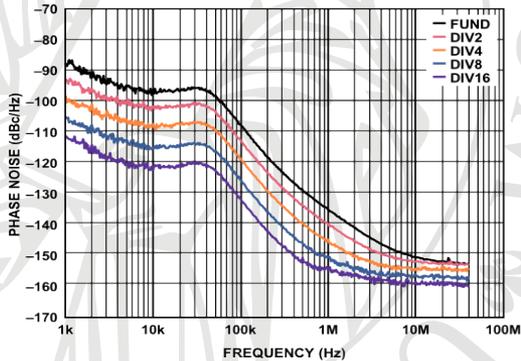


Figure 7. Closed-Loop Phase Noise, Fundamental VCO and Dividers, VCO = 2.2 GHz, PFD = 25 MHz, Loop Bandwidth = 40 kHz

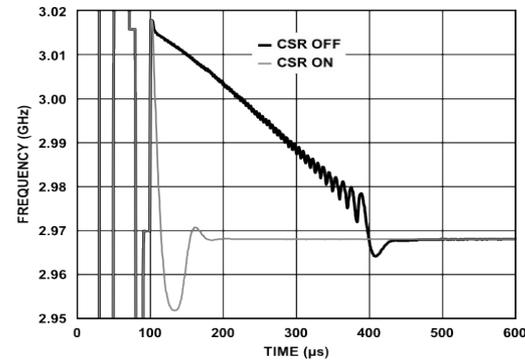


Figure 15. Lock Time for 100 MHz JUMP from 3070 MHz to 2970 MHz with CSR On and Off, PFD = 25 MHz, $I_{CP} = 313 \mu A$, Loop Filter Bandwidth = 20 kHz

Phase/Gain detector integrato: AD8302

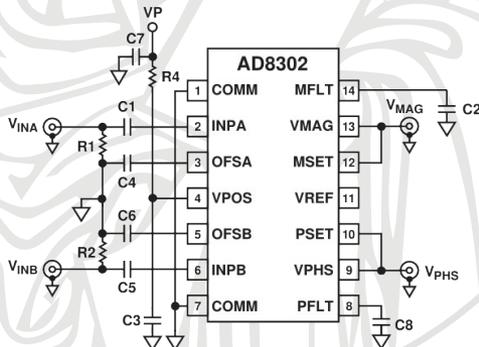
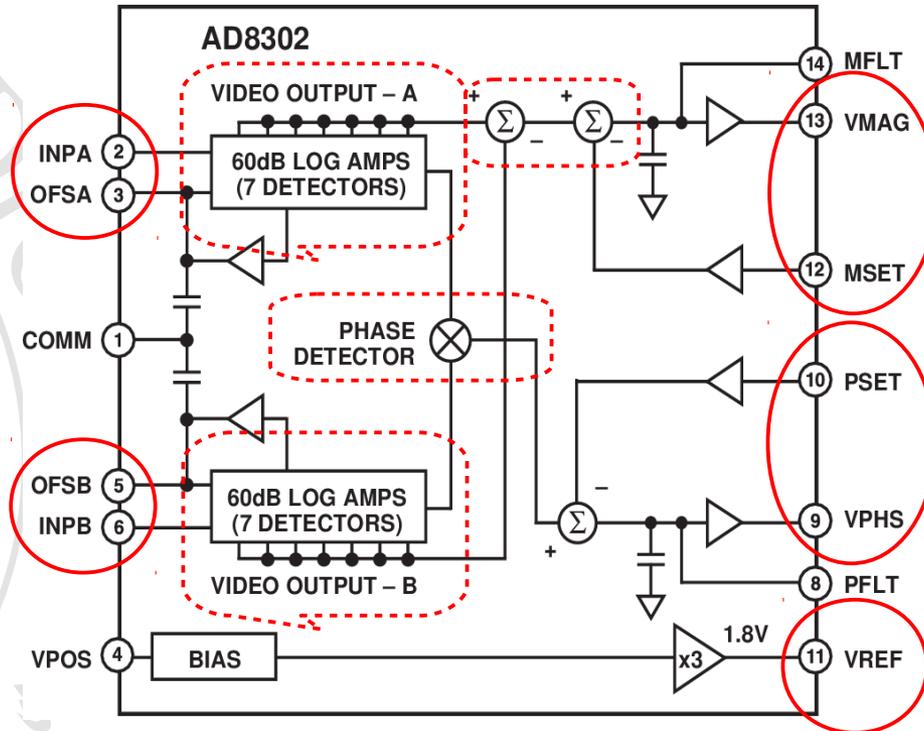
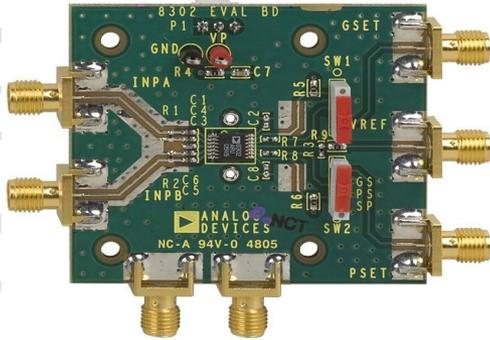
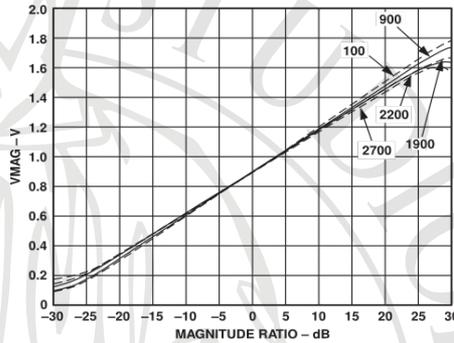
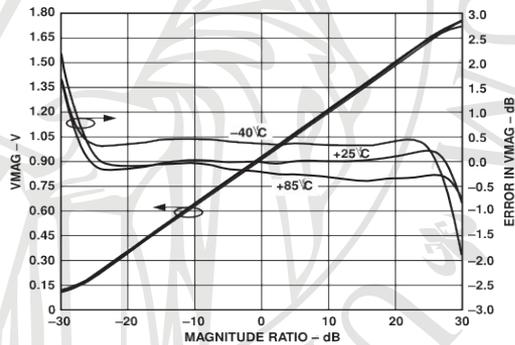


Figure 4. Basic Connections in Measurement Mode with 30 mV/dB and 10 mV/Degree Scaling

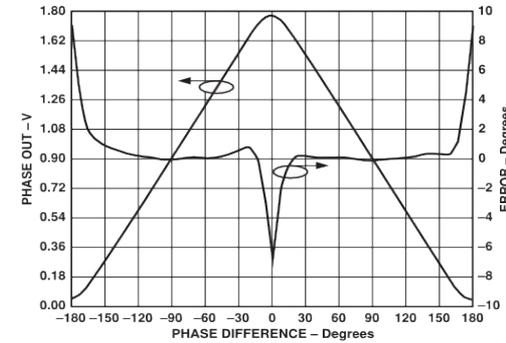
AD8302



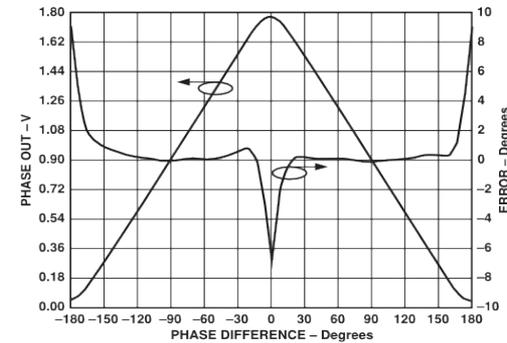
TPC 1. Magnitude Output (VMAG) vs. Input Level Ratio (Gain) V_{INPA}/V_{INPB} , Frequencies 100 MHz, 900 MHz, 1900 MHz, 2200 MHz, 2700 MHz, 25°C, $P_{INPB} = -30$ dBm, (Re: 50 Ω)



TPC 4. VMAG and Log Conformance vs. Input Level Ratio (Gain), Frequency 900 MHz, -40°C, +25°C, and +85°C, Reference Level = -30 dBm

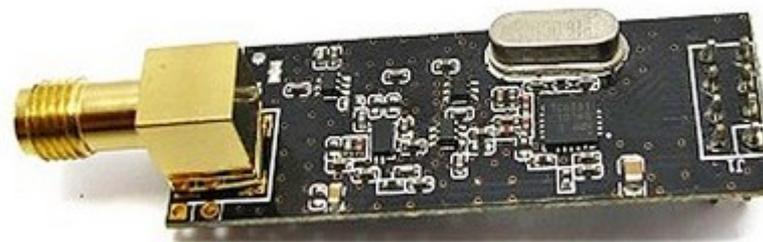
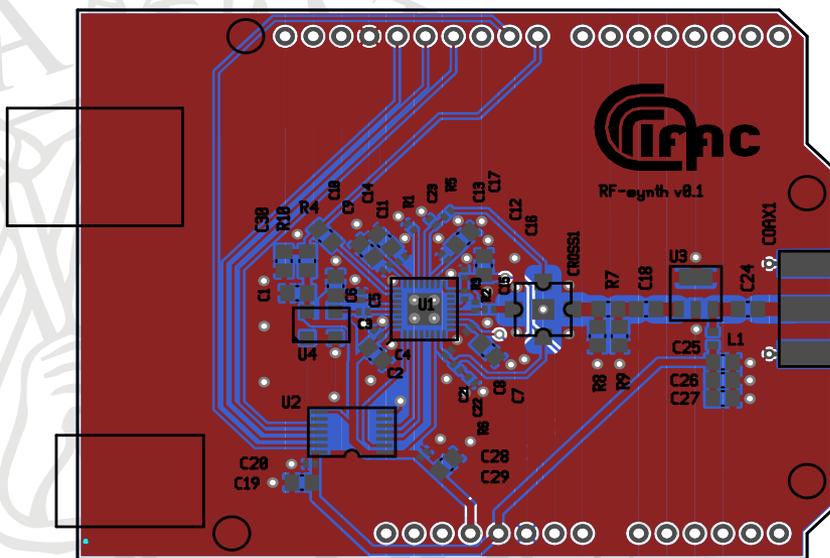


TPC 27. VPHS Output and Nonlinearity vs. Input Phase Difference, Input Levels -30 dBm, Frequency 900 MHz



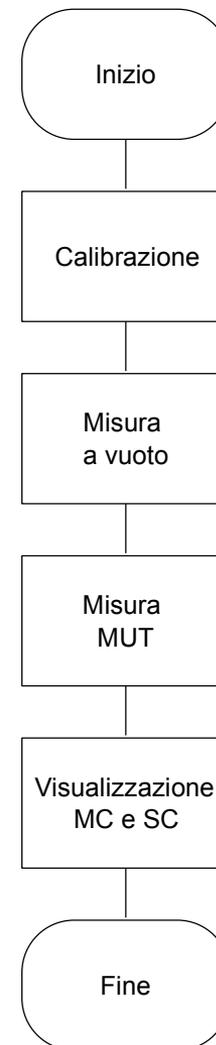
TPC 27. VPHS Output and Nonlinearity vs. Input Phase Difference, Input Levels -30 dBm, Frequency 900 MHz

Synth shield for ARDUINO



Firmware

- ANSI C for MicroChip PIC32 (MPLABX)
- La fase di calibrazione è attualmente soppressa



Evolutioni hardware

- Accoppiatore direzionale stampato
- Eliminazione isolatore RF o sua integrazione con componente SMT
- Integrazione del sensore su scheda
- Aumento range dinamico ricevitore (MAXIM chips)
- Cambio microcontrollore (ARM Cortex NXP)

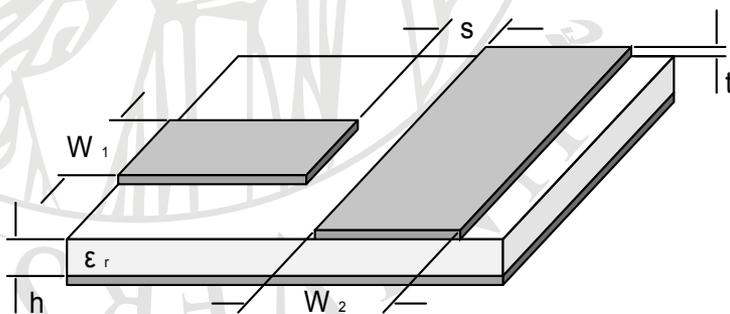
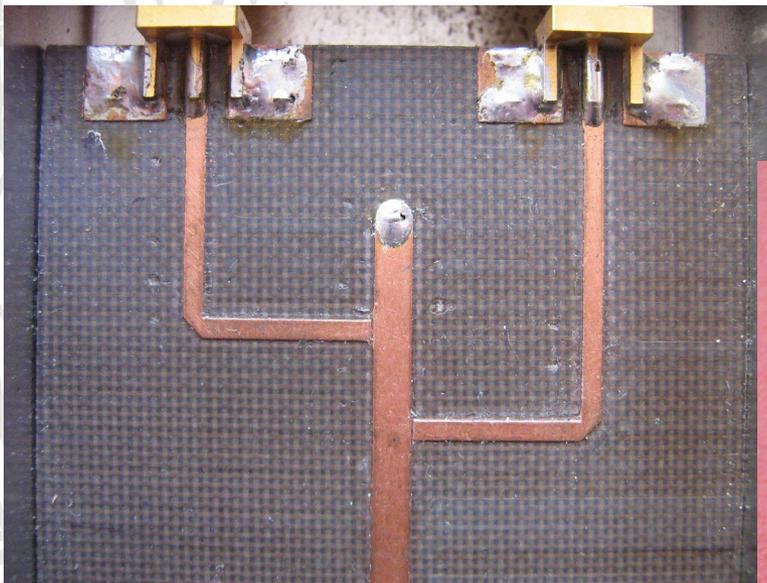
Problematiche integrazione su singola scheda

- Disadattamento sensore
- Larga banda a frequenza relativamente bassa
- Potenza

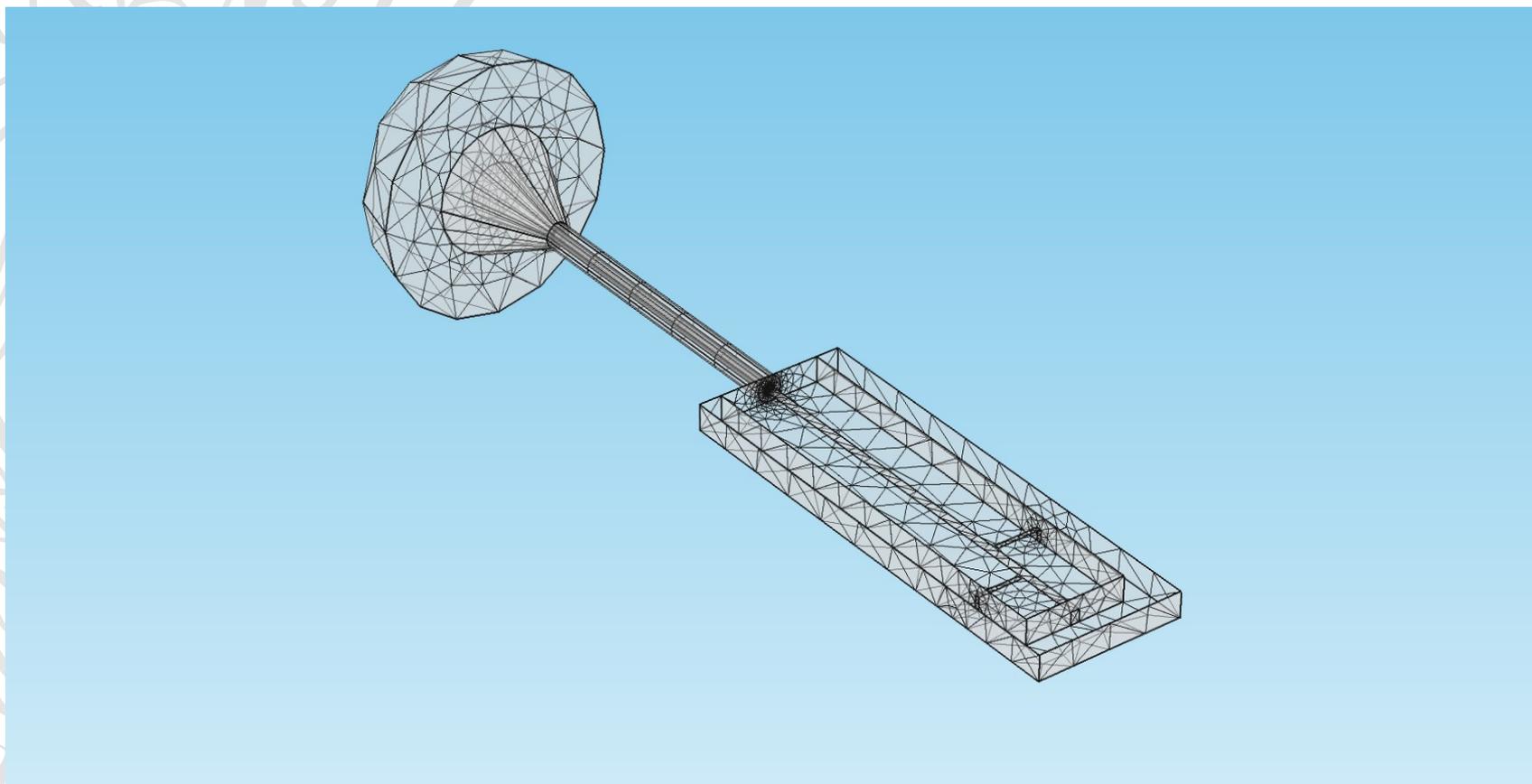
Ingegnerizzazione sensore

- Modellazione sensore attuale (FEM)
- Analisi nuovo tipo di accoppiamento (slot)
- Studio di un nuovo metodo di accoppiamento per superare le problematiche di quello complanare:
 - Non riproducibilità
 - Scarsa affidabilità
 - MA SOPRATTUTTO: elevato disadattamento
- Sviluppo di un modello approssimato per accoppiamento capacitivo a slot
- Simulazione
- Confronto risultati
- Realizzazione (ancora in corso)

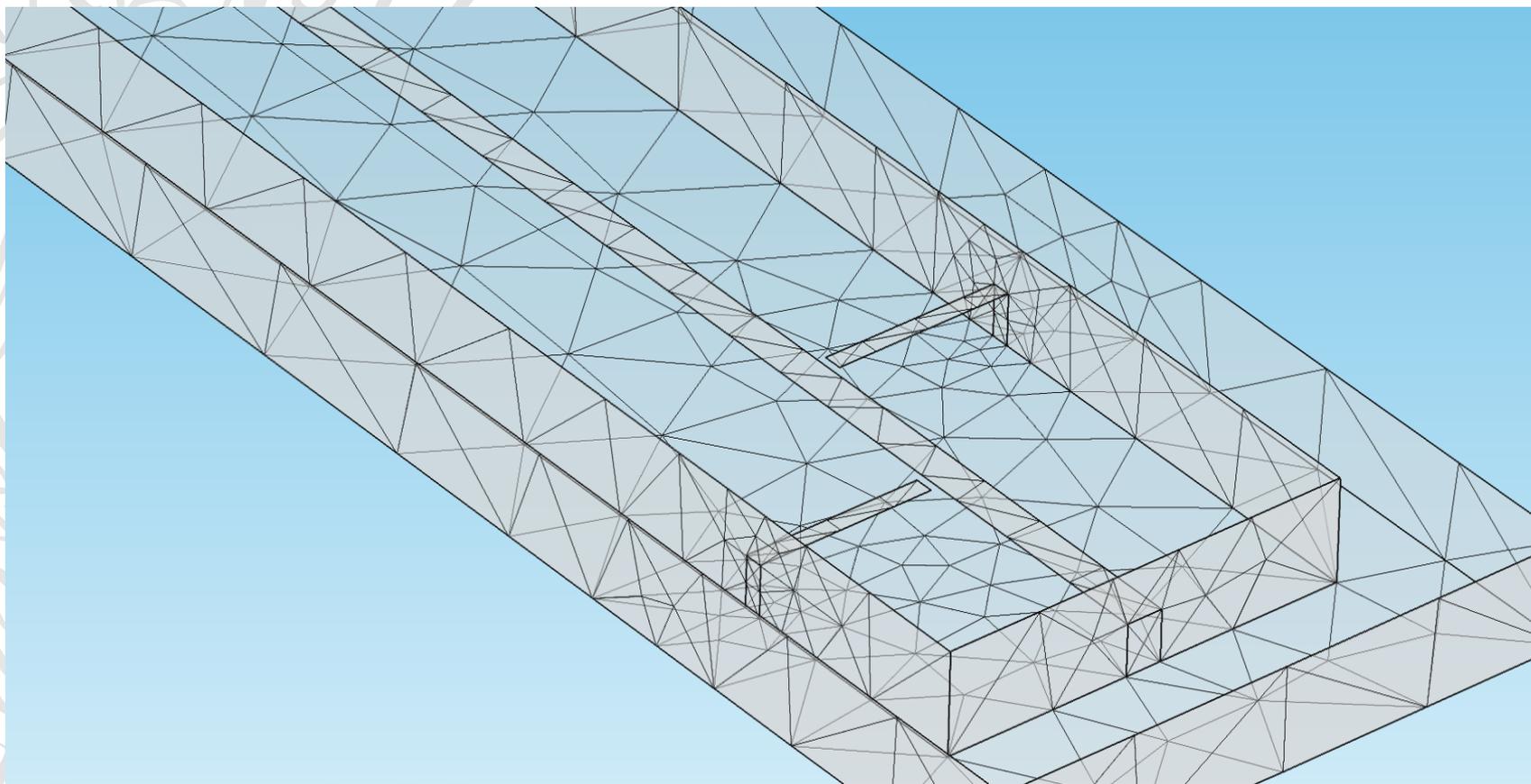
Vecchio tipo di accoppiamento



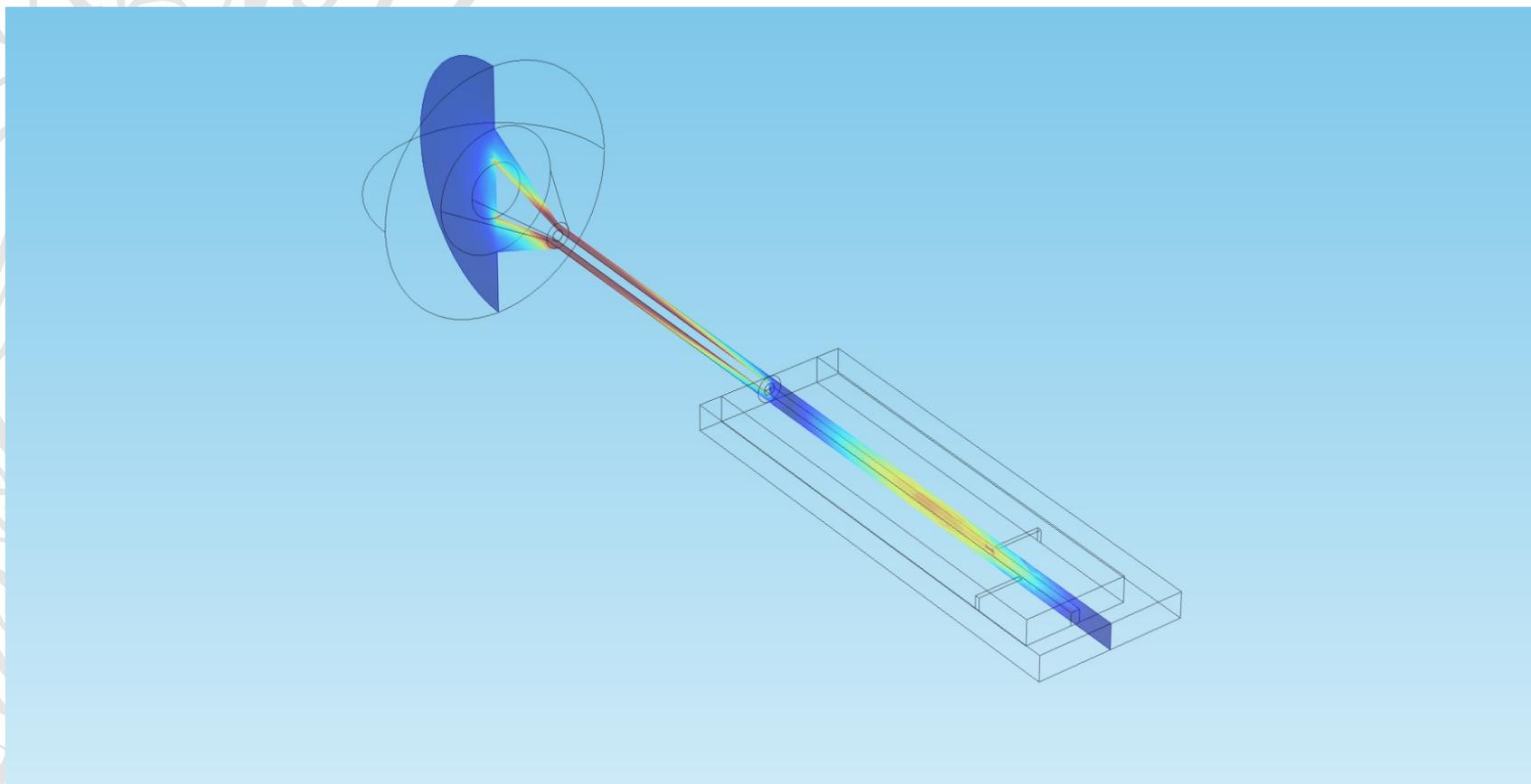
Modellazione sensore



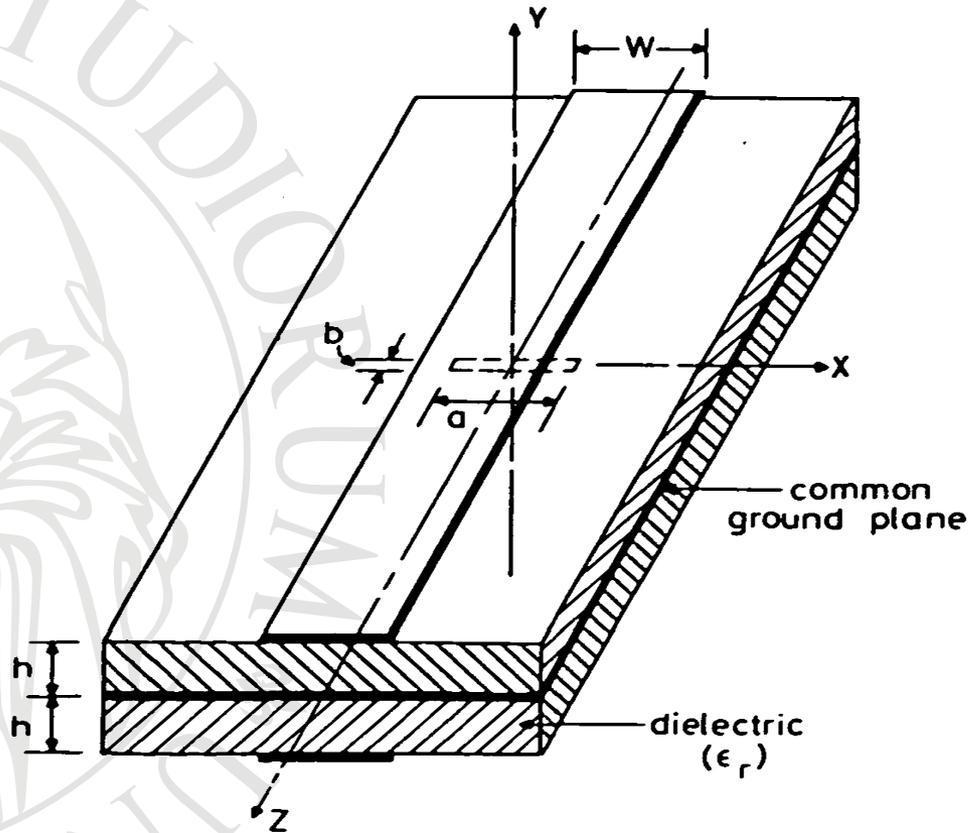
Modellazione sensore



Modellazione sensore



Nuovo accoppiamento a slot

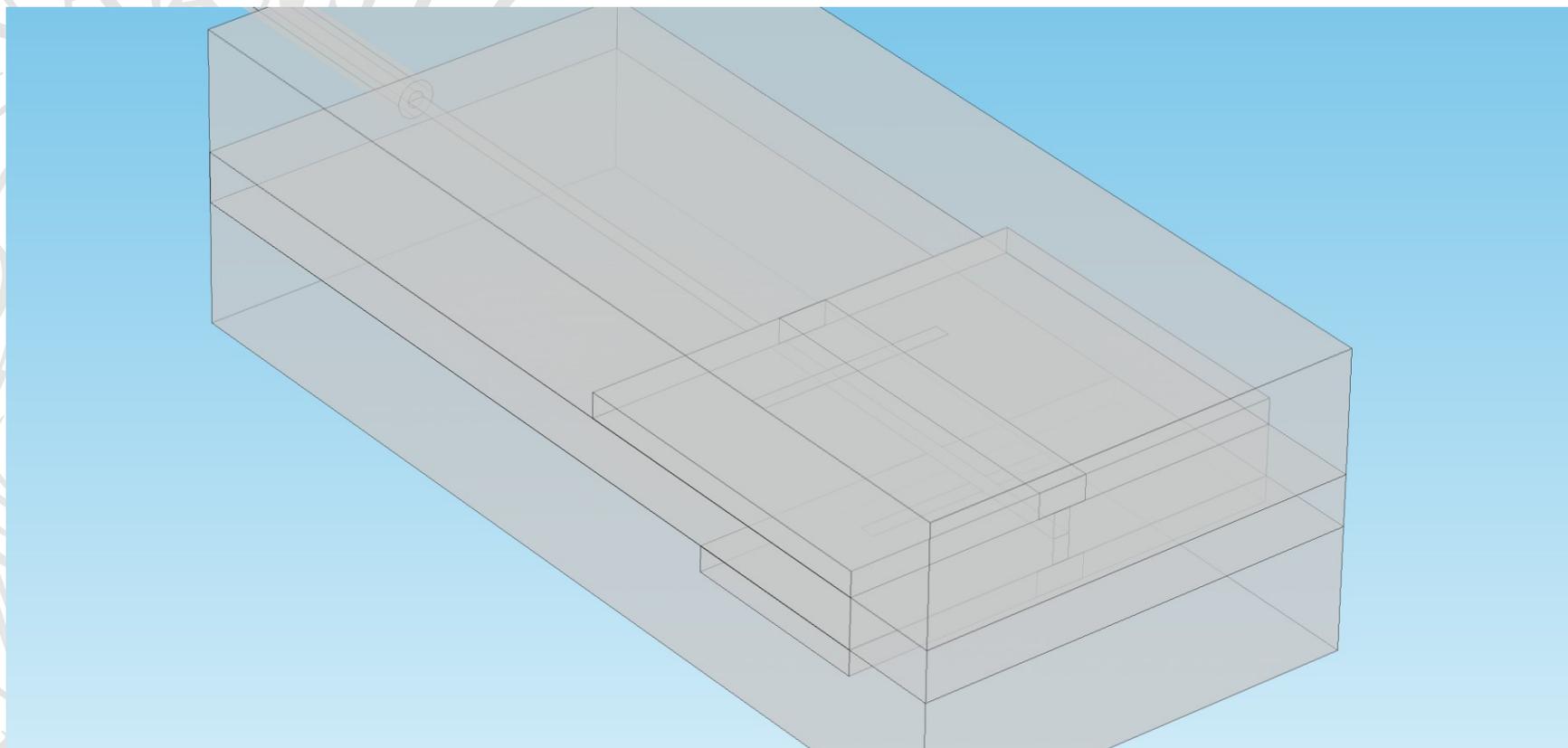


Sviluppo modello accoppiamento slot

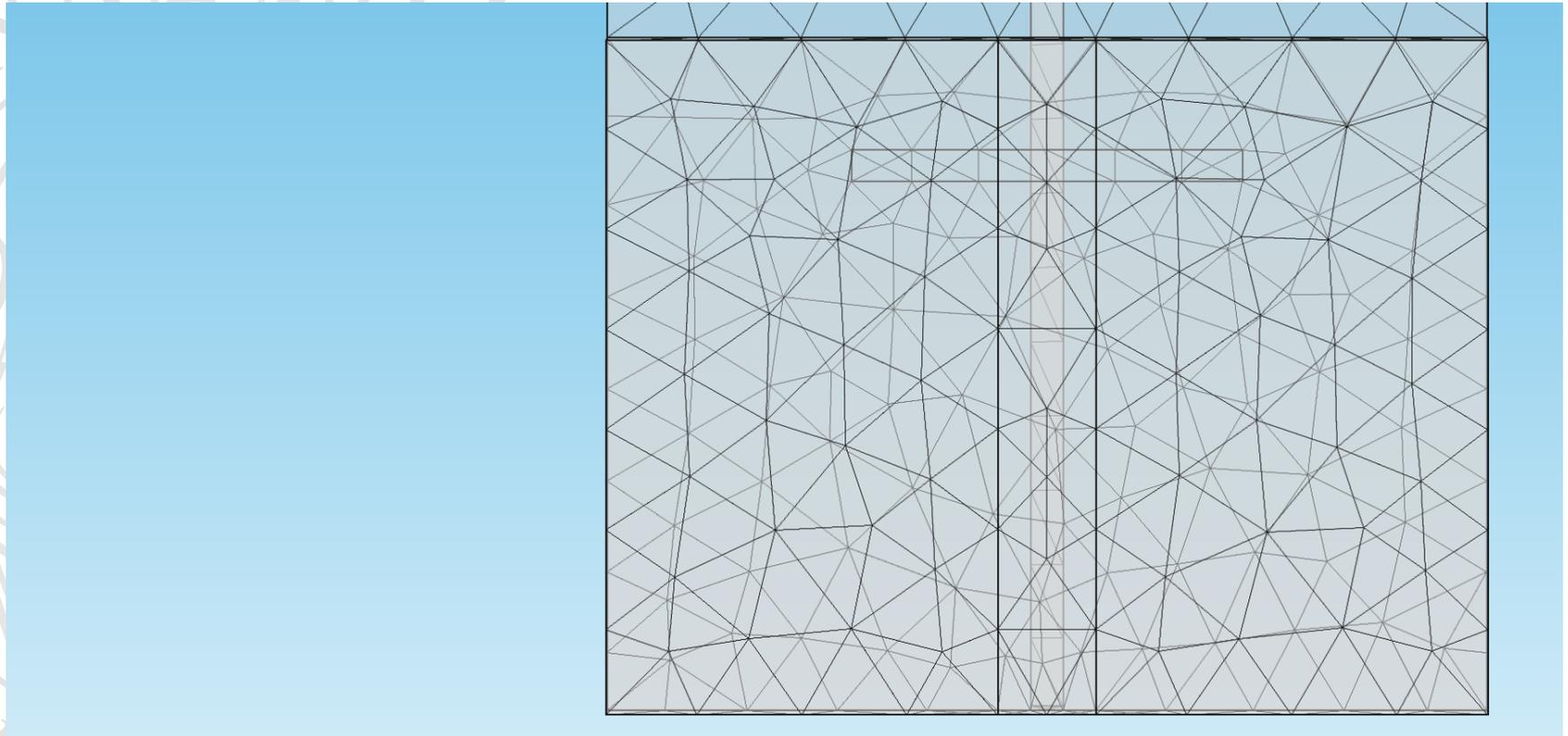
$$C = \begin{cases} -20 \log \left(\frac{\pi a^3 \sqrt{\epsilon_{eff}}}{24 w' h} \left(-\epsilon_0 \eta_0 + 2 \frac{\mu}{\eta_0} \right) \right) & a \leq 2b \\ -20 \log \left(\frac{\pi \omega \sqrt{\epsilon_{eff}}}{48 w' h} \left(-\epsilon_0 \eta_0 a b^2 + \frac{\mu}{\eta_0} \frac{a^3}{\ln(4 \frac{a}{b}) - 1} \right) \right) & a > 2b \end{cases}$$

$$w' = \frac{h}{Z_0} \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

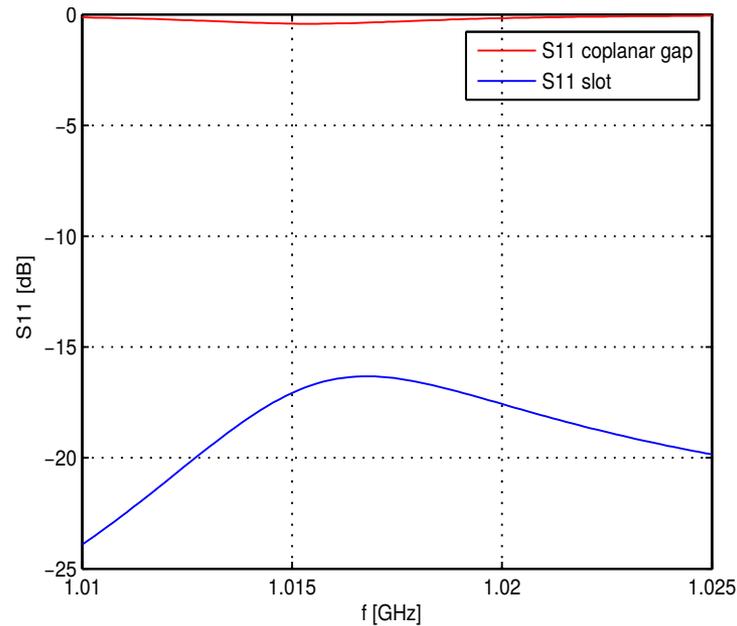
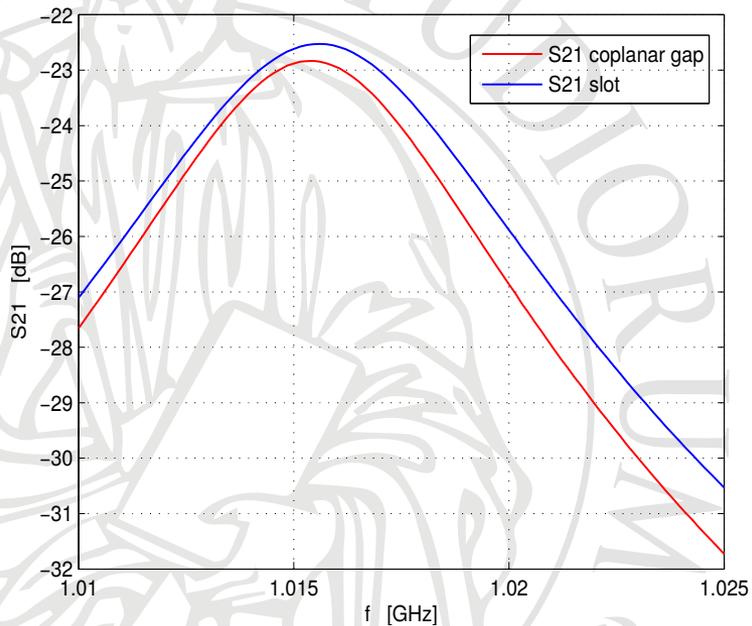
Simulazione accoppiamento a slot



Simulazione accoppiamento a slot

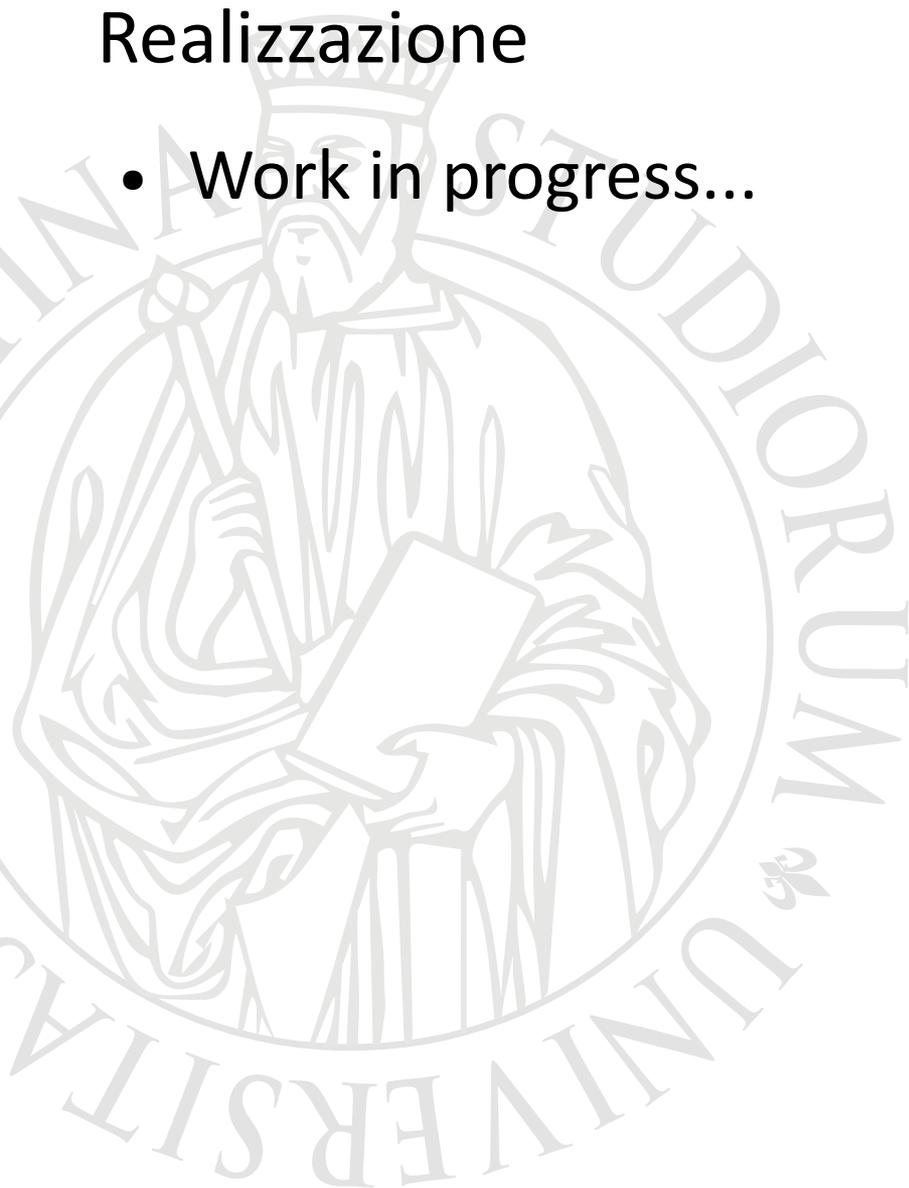


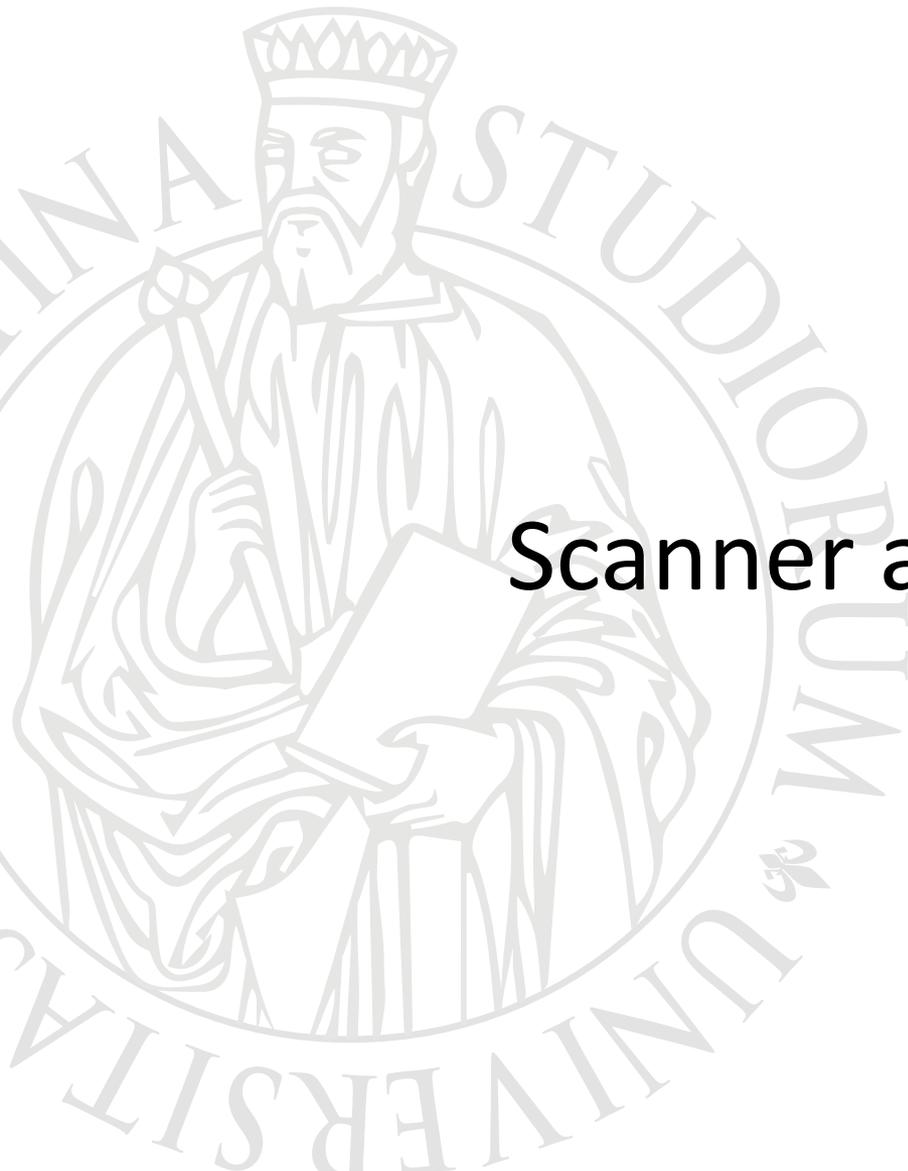
Comparazione accoppiamenti



Realizzazione

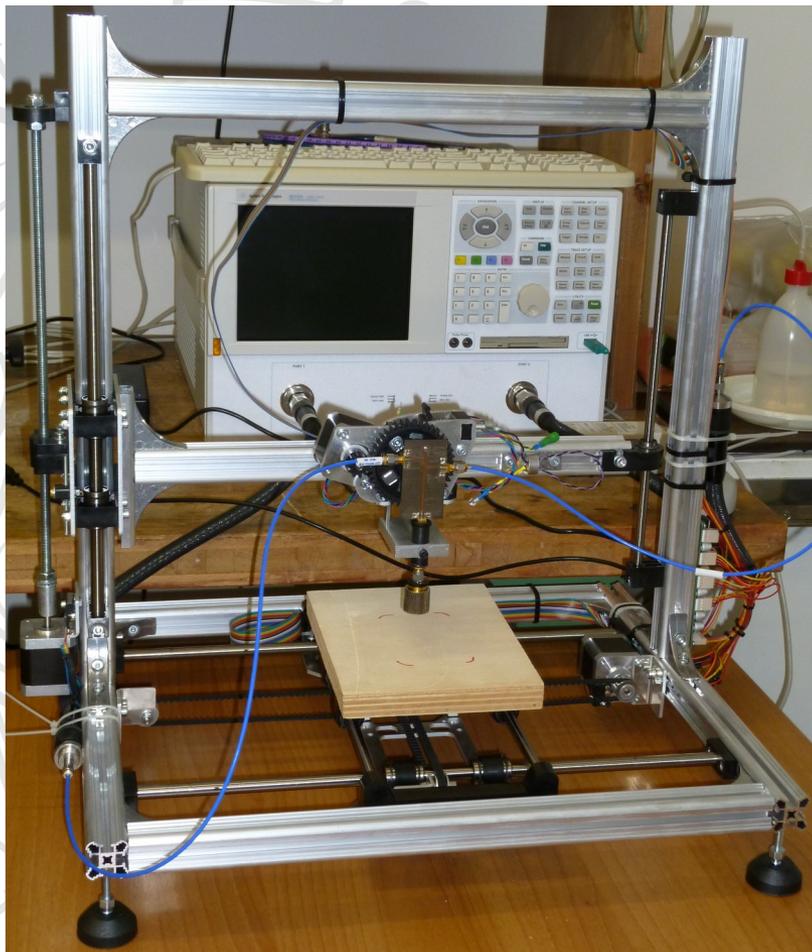
- Work in progress...



A large, light gray watermark of the University of Florence seal is visible in the background, featuring the same seated figure and text as the logo in the top left.

Scanner a microonde

Microwave scanner



VNA

- Agilent N5230A
- 300 kHz – 20 GHz
- Dynamic range 108 dB
- 16001 points max, <math><9\ \mu\text{s}/\text{point}</math>

SENSOR

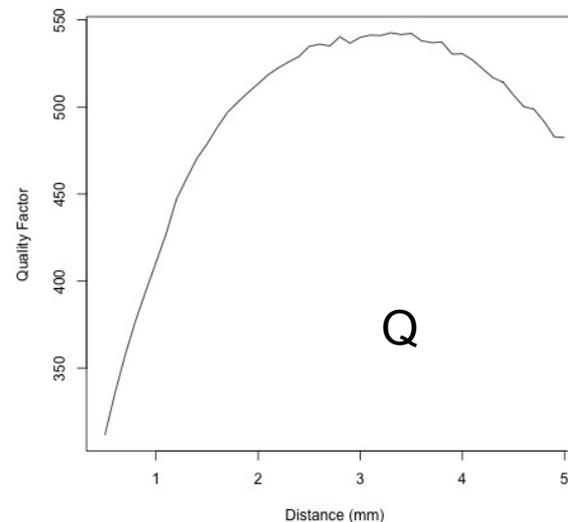
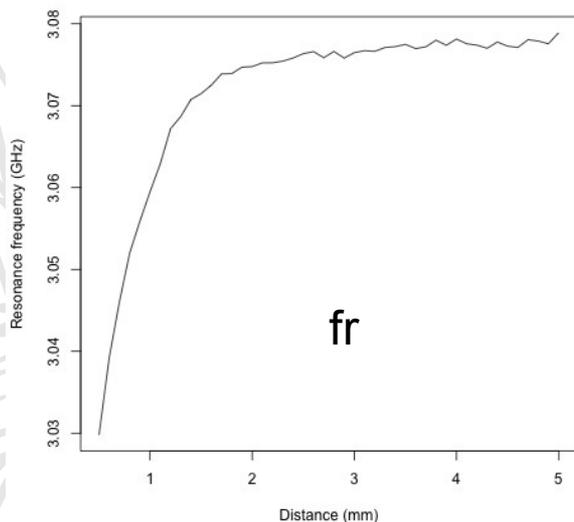
- Resonant (microstrip cavity)
- Probe head: coaxial APC-7 (diameter 2.6 mm internal, 7 mm external)
- Frequency range: 1 – 10 GHz

CNC

- Max scanned area: 200 x 200 x 200 mm
- X & Y resolution: 15 μm
- Z resolution: 0.39 μm
- Speed: <math><1\ \text{pt}/\text{sec}</math>

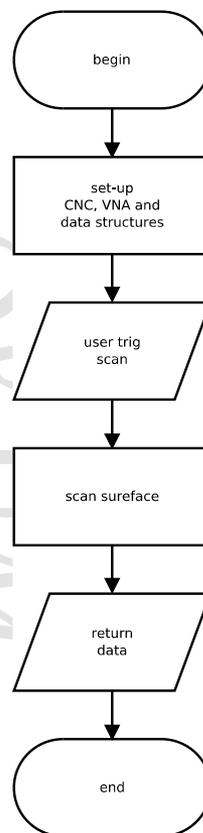
Modellazione sensore

La frequenza di risonanza ed il fattore di qualità del sensore dipendono dal materiale investigato e sono sensibili alla presenza di corpi estranei

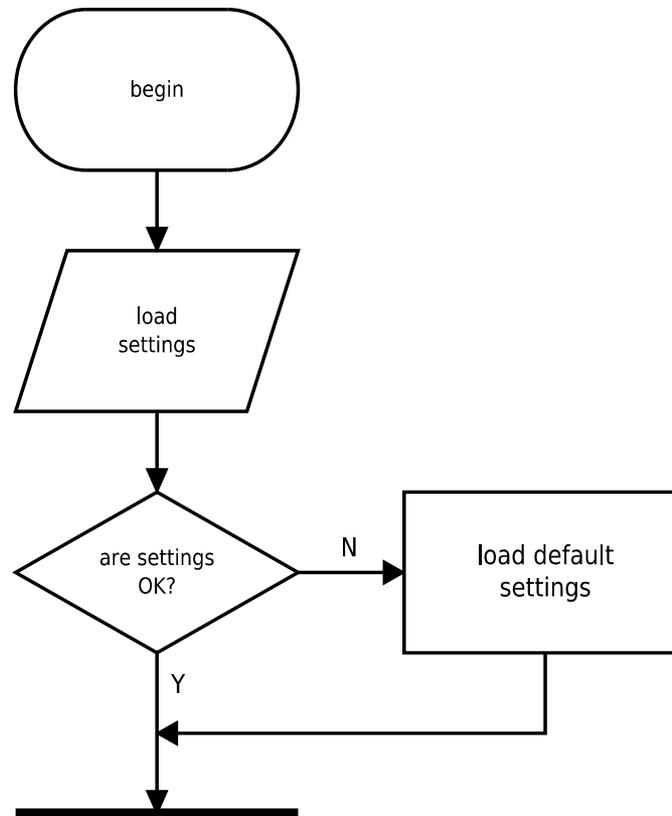
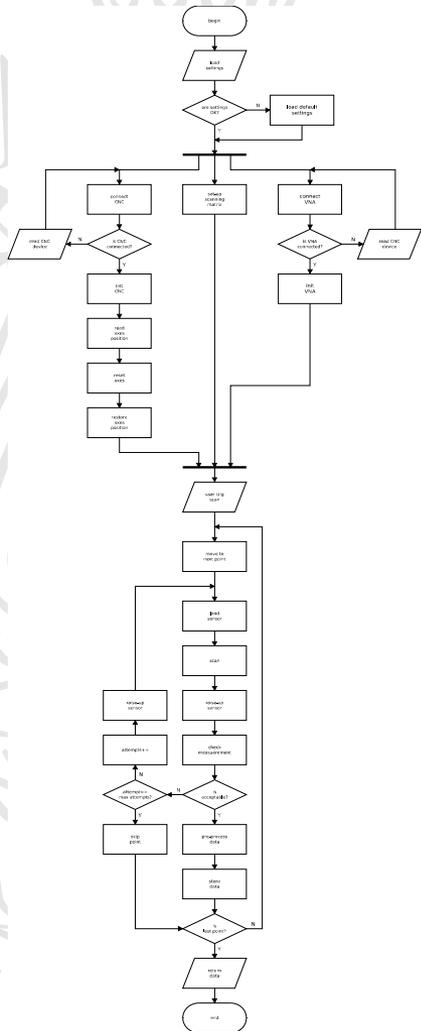


Esempio: dipendenza di f_r e Q dalla profondità di una vite metallica su base di legno alla frequenza di 3 GHz

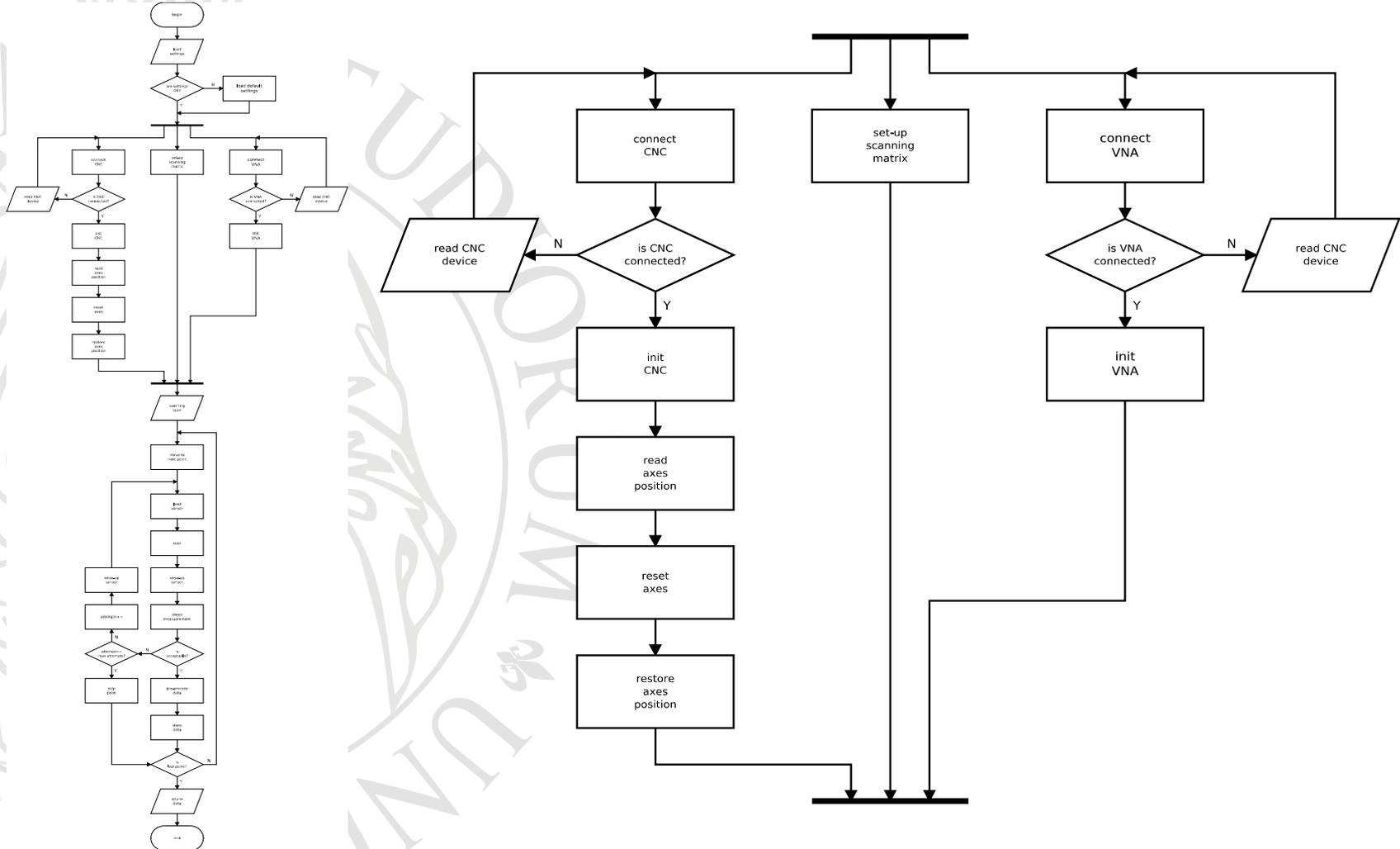
Procedure di controllo



Procedure di controllo



Procedure di controllo



Test: campioni

Tavola di legno gessata 180 x 80 x 17 mm



Mattonella di intonaco 160 x 140 x 39 mm

I campioni sono stati preparati con delle cavità in modo da poter essere facilmente bagnati o da potervi inserire parti metalliche o di altro materiale.

Test: tavoletta di legno

Rilevamento di una vite metallica (diametro 1.9 mm) inserita longitudinalmente a circa 2 mm di profondità

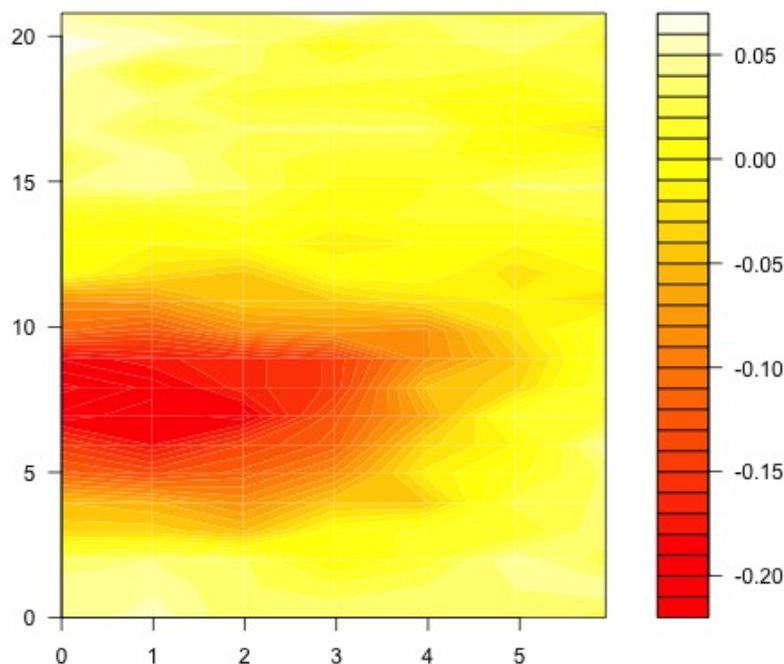


Immagine in falsi colori della variazione percentuale relativa della frequenza di risonanza del sensore:

$$\Delta F = 100 \times \frac{f - f_{ref}}{f_{ref}}$$

f frequenza di risonanza di riferimento (ad esempio in aria o il valor medio dei valori su tutto il campione)

Test: tavoletta di legno

Rilevamento di una vite metallica (diametro 1.9 mm) inserita verticalmente al variare della sua profondità dalla superficie del campione (da 1.2 a 2 mm)

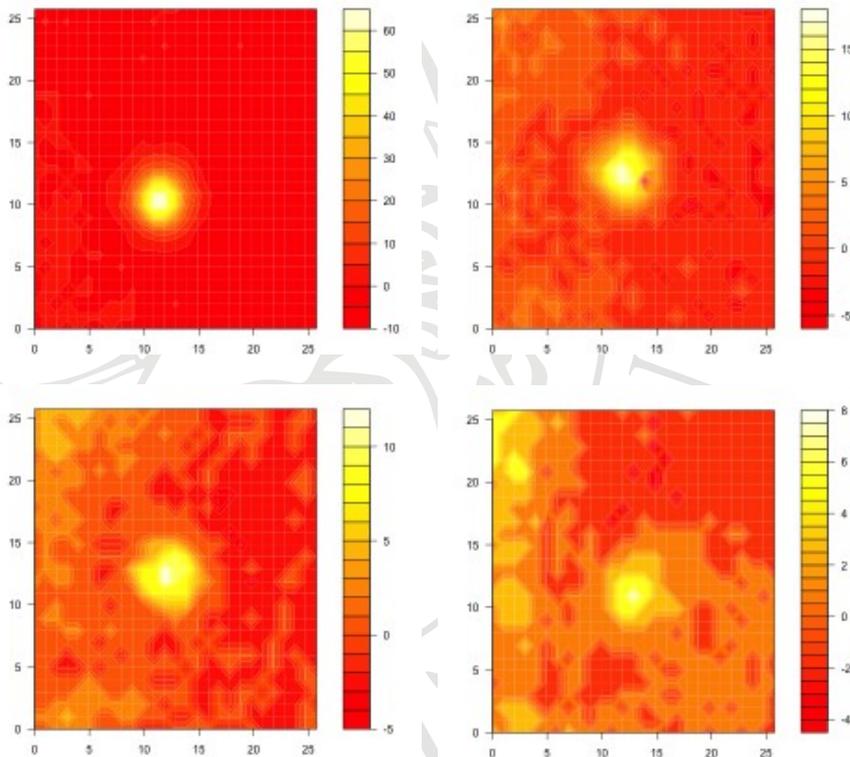


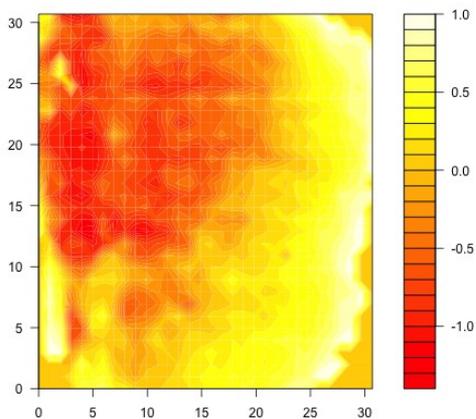
Immagine in falsi colori della variazione percentuale relativa del fattore di qualità del sensore:

$$\Delta Q = 100 \times \frac{Q - Q_{ref}}{Q_{ref}}$$

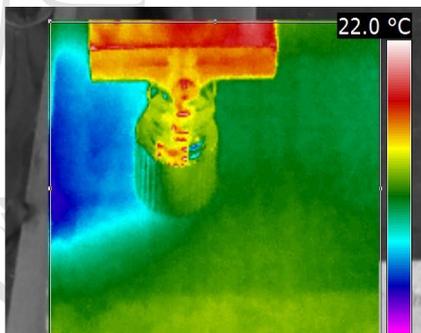
Q_{ref} fattore di qualità di riferimento (ad esempio in aria o il valor medio dei valori su tutto il campione)

Test: mattonella intonaco

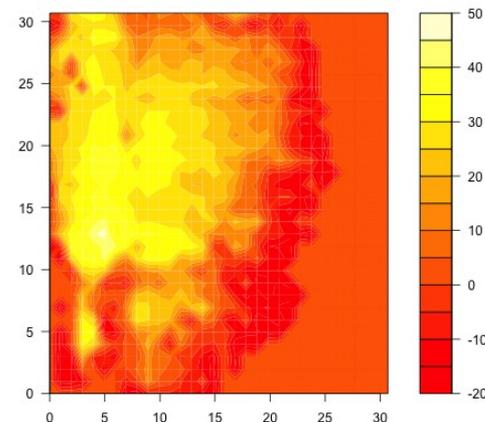
Acqua assorbita da una cavità laterale posta a circa 2 mm dalla superficie della mattonella. Frequenza operativa 4.5 GHz.



Mappa ΔF
presenza acqua in rosso



Termografia



Mappa ΔQ
presenza acqua in giallo

Sviluppi

- Analisi su materiali lapidei e cementi antichi (LMRH Parigi)
- Spettroscopia dielettrica su nanomateriali (Nottingham University)
- Imaging su carta per mappe umidità (Università Roma 3)
- Coativazione con stratigrafia nei THz (ENEA Frascati)



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DINFO
DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE



GPR SFCW RADAR

Firenze, 16 Dicembre 2014

Intro

Scansione superfici (nel campo dei beni culturali e non):

- GPR classico (“bassa” frequenza, molto penetrante)
- Metodi in alta frequenza (THz, IR poco penetranti)

Assenza di un metodo per l'indagine ad una profondità intermedia (10-20 cm dalla superficie)

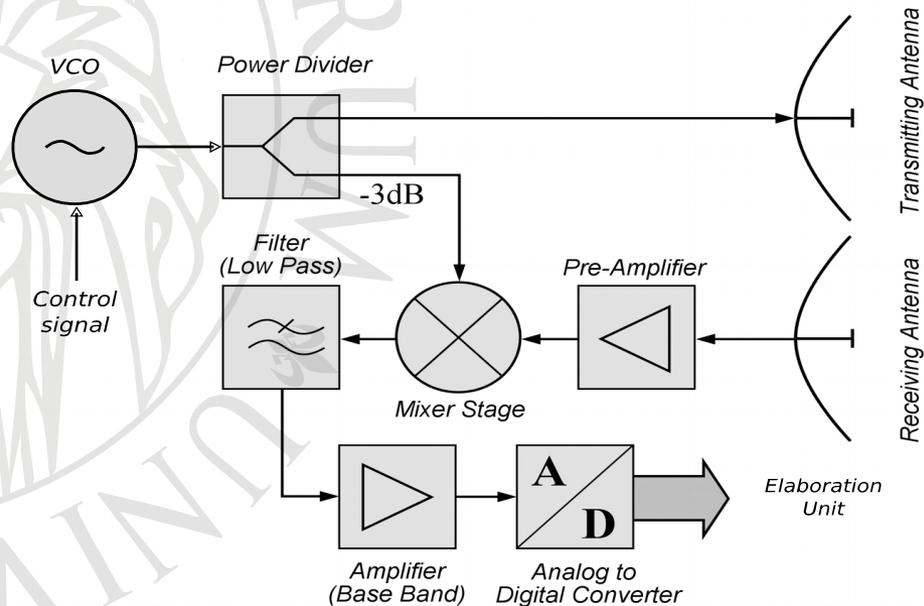


Microonde

Radar FMCW

Il radar FMCW è un particolare tipo di radar che sfrutta la modulazione in frequenza (*Frequency Modulated*) di un'onda continua (*Continuous Wave*).

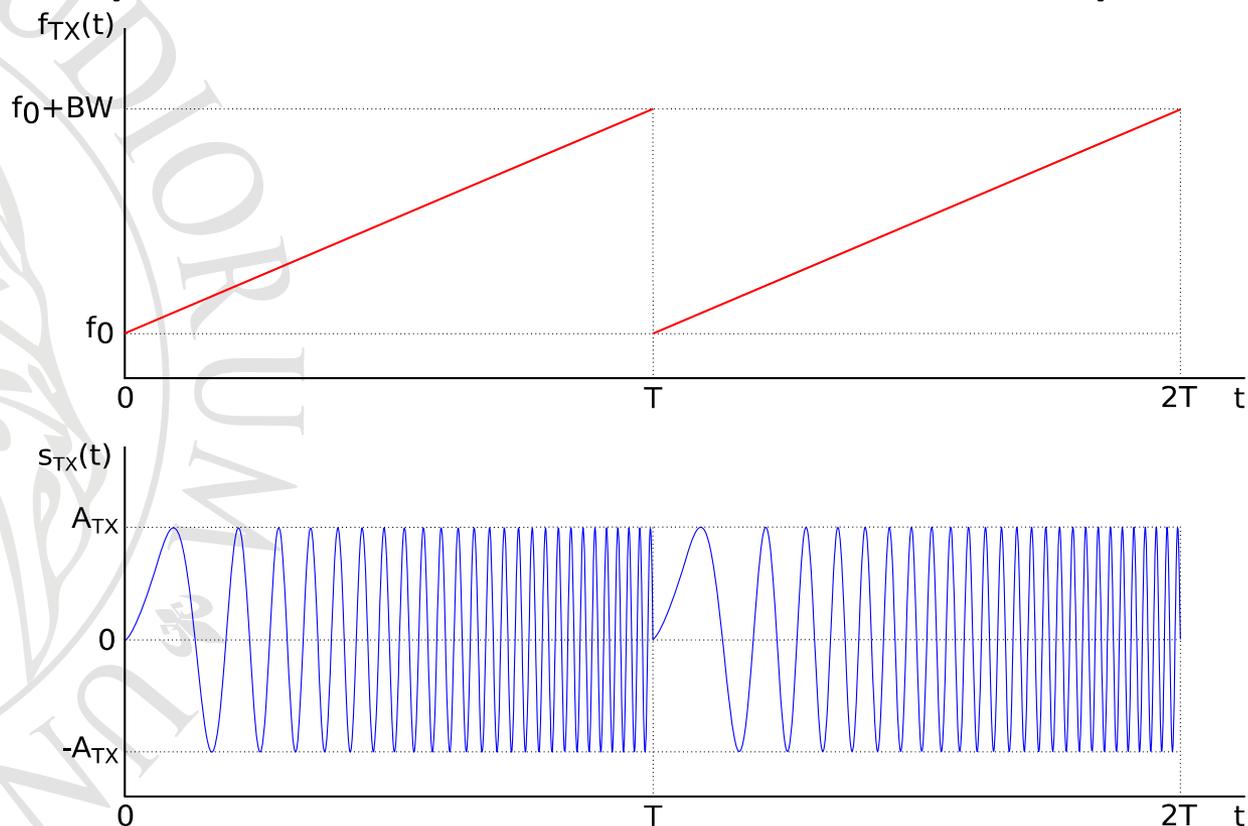
La modulazione in frequenza permette di misurare la distanza del target attraverso la misura della frequenza del segnale (in BF) ottenuto dal battimento tra il segnale trasmesso e quello ricevuto.



Modulazioni

Il segnale prodotto da un radar FMCW viene detto *chirp* e la modulazione può avere diverse forme, le più comuni sono:

- Dente di sega
- Triangolare
- Sinusoidale
- Quadrata



Principio di funzionamento

Una modulazione molto diffusa è quella a dente di sega, una modulazione in frequenza lineare e periodica.

$$s_{TX} = A_{TX} \cos(2\pi f_{TX}t + \phi_0)$$

$$f_{TX} = f_0 + k_f t \quad 0 \leq t \leq T$$

$$k_f = \frac{BW}{T}$$

$$\Delta t = 2 \frac{d}{v_f} \quad (\text{in aria } v_f = c)$$

$$s_{RX} = A_{RX} \cos(2\pi f_{RX}t)$$

Principio di funzionamento

$$\begin{aligned}
 s_{MIX} &= s_{TX} \cdot s_{RX} \\
 &= A_{TX} A_{RX} \cos(2\pi f_{TX} t) \cos(2\pi f_{RX} t) \\
 &= \frac{A_{TX} A_{RX}}{2} [\cos(2\pi(f_{TX} + f_{RX})t) + \cos(2\pi(f_{TX} - f_{RX})t)] \\
 &= \frac{A_{TX} A_{RX}}{2} [\cos(2\pi(2f_0 + k_f \Delta t)t) + \cos(2\pi k_f \Delta t t)]
 \end{aligned}$$

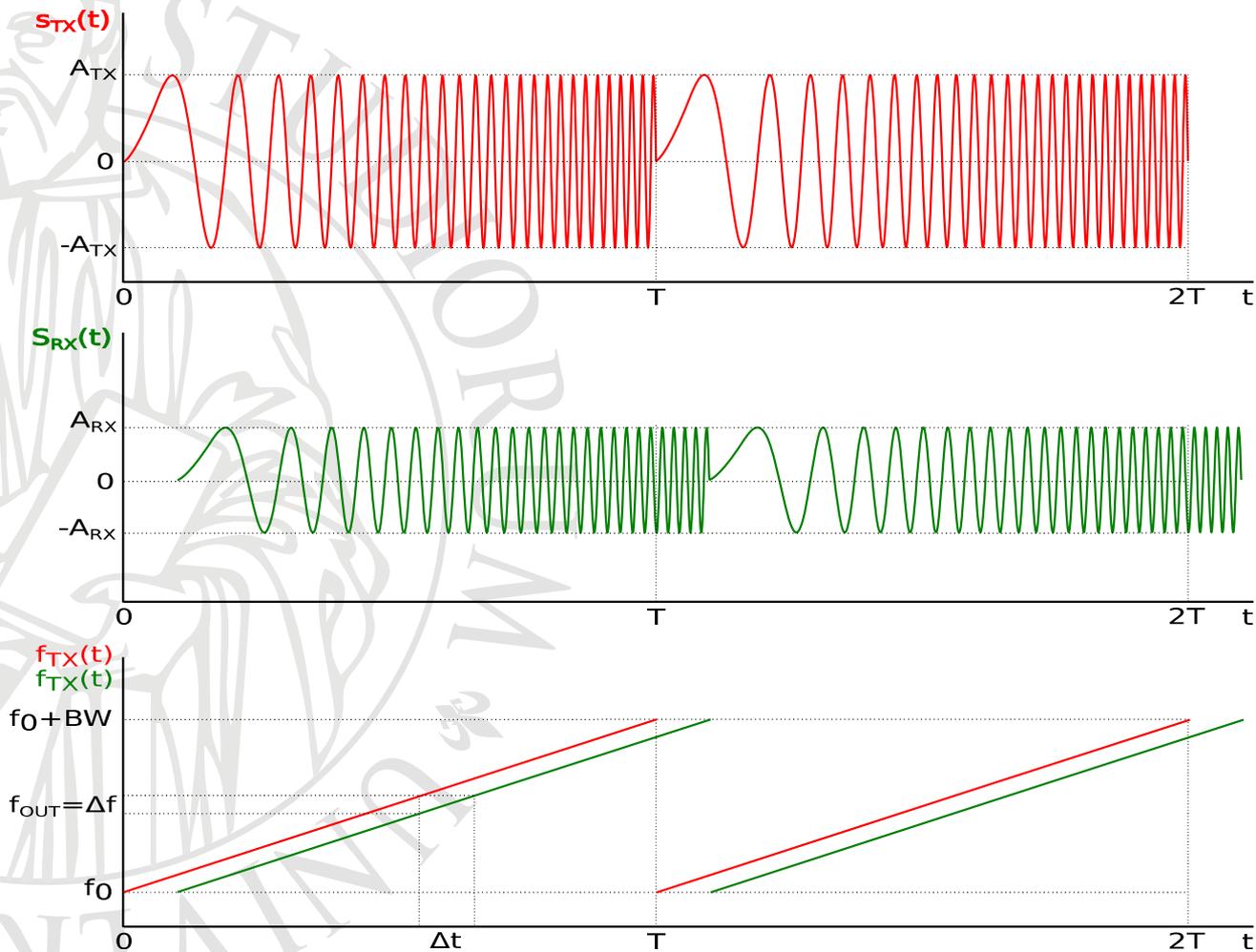
LPF

$$s_{OUT} = \frac{A_{TX} A_{RX}}{2} \cos(2\pi k_f \Delta t t)$$

$$f_{OUT} = k_f \Delta t = \frac{BW}{T} 2 \frac{d}{v_f}$$

$$d = \frac{f_{OUT} v_f T}{2BW}$$

Esempio segnali TX e RX



FMCW

In generale i radar FMCW sono adatti per applicazioni low-range.

Il principio di funzionamento del radar FMCW permette di ottenere un sistema radar completo a basso costo e per questo motivo i radar FMCW si sono diffusi molto negli ultimi anni principalmente nei settori:

- Automotive
- Marittimo
- Industriale

SFCW

Il radar SFCW (Stepped FMCW) è una variante del FMCW dove l'impulso sintetizzato è modulato in frequenza a passi discreti.

Questo approccio permette di semplificare ulteriormente la struttura del radar in quanto, sotto determinate condizioni, in uscita dal mixer si ottiene un segnale in continua che può essere quindi campionato con maggior semplicità.

$$f_{TX_n} = f_0 + \frac{n}{N}BW \quad 0 \leq n \leq N - 1$$

$$T = NT_n$$

$$s_{RX} = A_{RX} \cos(2\pi f_{RX_n} + \phi_n)$$

$$d < \frac{v_f T_n}{2} \Rightarrow f_{RX_n} = f_{TX_n}$$

$$s_{MIX_n} = \frac{A_{TX} A_{RX}}{2} \cos(\phi_n) \quad \phi_n = \frac{2\pi 2df_{TX_n}}{v_f} = 2\pi \frac{2d}{v_f} \left(f_0 + \frac{n}{N}BW\right)$$

$$\updownarrow$$

$$S_m = \frac{A_{TX} A_{RX}}{2} \left[\delta \left(m - \frac{2dBW}{v_f} \right) + \delta \left(m + \frac{2dBW}{v_f} \right) \right]$$

Modulo in banda X



SiversIMA RS3400X/00

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
RF: (Probing signal)				
Minimum output frequency			9250	MHz
Maximum output frequency	10750			MHz
Frequency stability			35	ppm
Bandwidth stability			35	ppm
Frequency setting resolution	2			kHz
Frequency settling time		40	250	μs
Output port return loss	12			dB
IF: (Sensor output)				
Full reflection response amplitude	-12	-6	0	dB _{ref}
Reflection response amplitude variation		3	3.6	dB
Sensor performance (uncalibrated):				
Range measurement variation		100	300	ppm

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
RF output power	-5	0	5	dBm
RF output power variation (over frequency)			5	dB
RF output power variation (over temperature)			5	dB
Harmonics related to carrier			-20	dBc
Spurious (synthesizer related)			-26	dBc
Spurious (not synthesizer related)			-60	dBc
SSB phase noise @ 100 kHz from carrier			-73	dBc/Hz
RF to IF conversion efficiency		-20		dB
Sensor dynamic range		-80		dBc
Power consumption		500		mW
Total internal capacitance			100	nF

Modulo in banda K



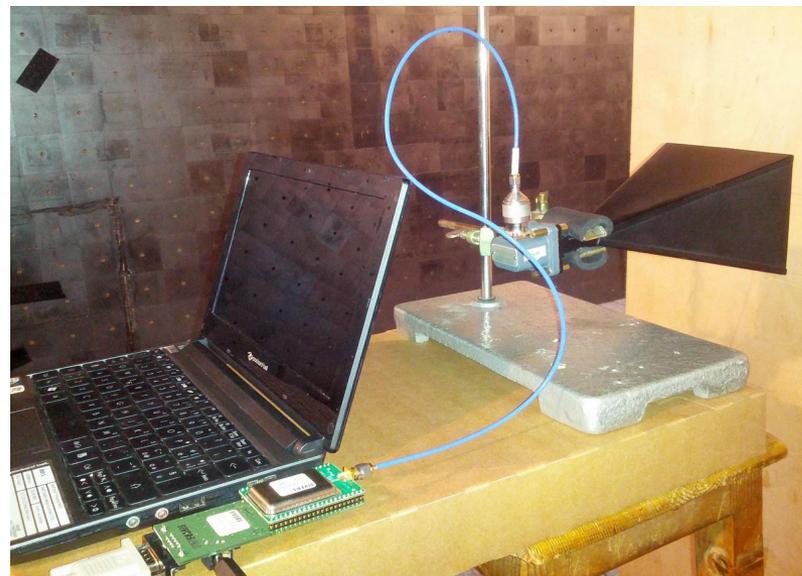
SiversIMA RS3400K/00

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
RF: (Probing signal)				
Minimum output frequency			24000	MHz
Maximum output frequency	25500			MHz
Frequency stability			35	ppm
Bandwidth stability			35	ppm
Frequency setting resolution	2			kHz
Frequency settling time		40	250	μs
Output port return loss	12			dB
IF: (Sensor output)				
Full reflection response amplitude	-12	-6	0	dB _{ref}
Reflection response amplitude variation		3	3.6	dB
Sensor performance (uncalibrated):				
Range measurement variation		100	300	ppm

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
RF output power	5	10	15	dBm
RF output power variation (over frequency)			5	dB
RF output power variation (over temperature)			5	dB
Harmonics related to carrier			-20	dBc
Spurious (synthesizer related)			-26	dBc
Spurious (not synthesizer related)			-60	dBc
SSB phase noise @ 100 kHz from carrier			-67	dBc/Hz
RF to IF conversion efficiency		-20		dB
Sensor dynamic range		-80		dBc
Power consumption		900		mW
Total internal capacitance			100	nF

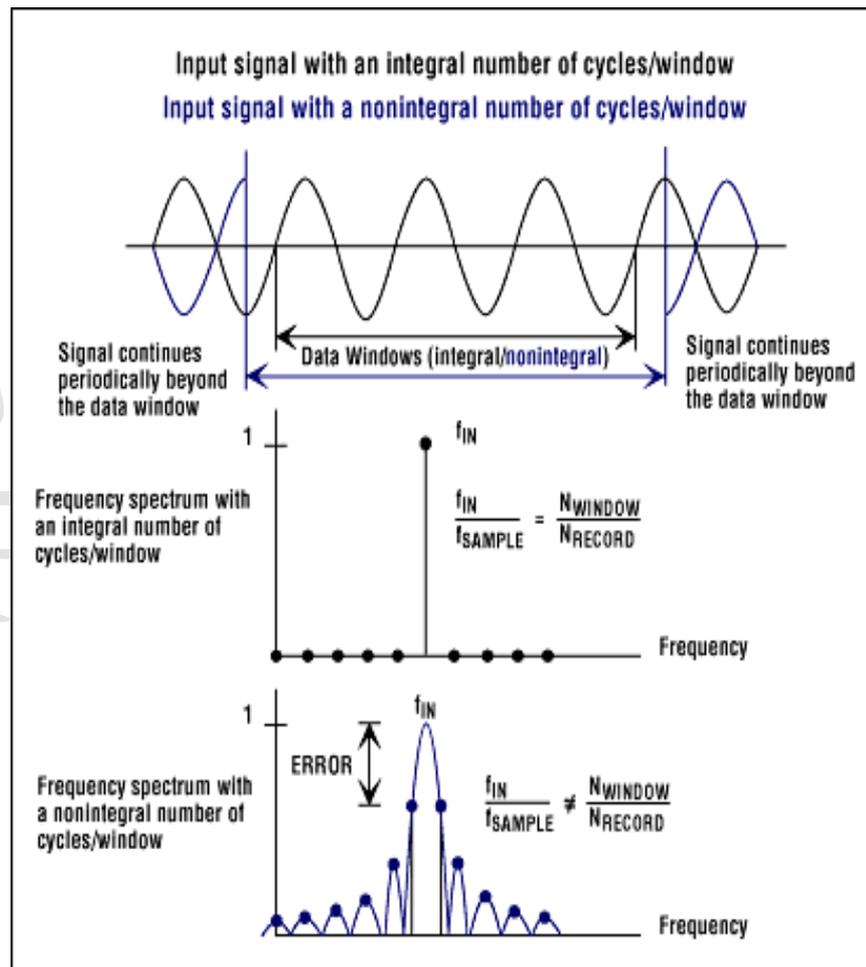
Applicazione come GPR

Una delle attività su cui stiamo lavorando è la realizzazione di un GPR (Ground Penetrating Radar) basato su di uno dei moduli FMCW commerciali appena illustrati.



Spectrum leakage

La limitatezza della banda disponibile impone un vincolo sulla massima risoluzione ottenibile trasformando i campioni del segnale numerico in uscita tramite DFT (*Discrete Fourier Transform*) a causa di un fenomeno detto *spectral leakage*.

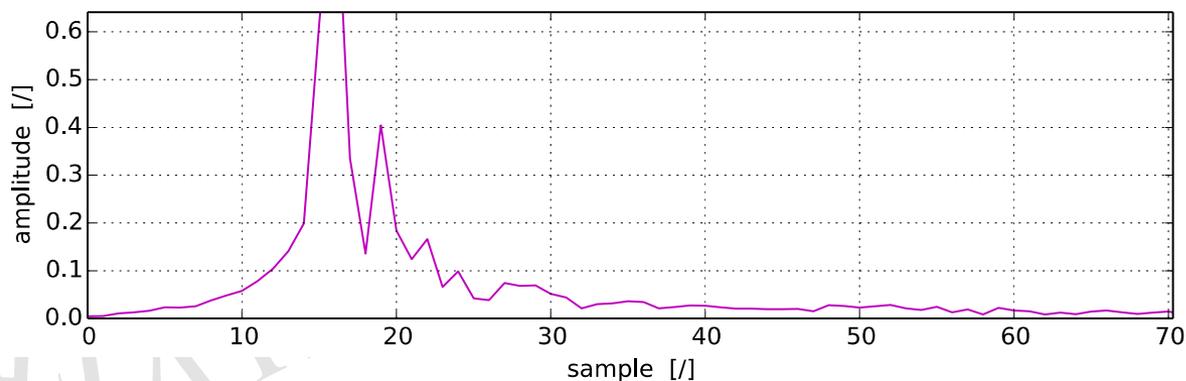
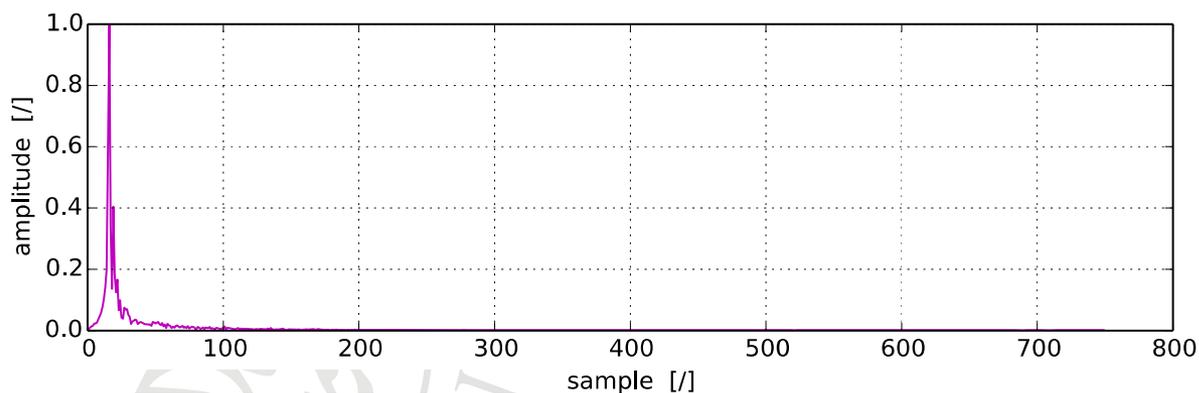


Problemi dovuti al leakage

- Rilevazione target singolo
 - Incapacità di misura precisa della distanza
 - Impossibilità di rilevare target vicini
- Rilevazione target multipli
 - Impossibilità di distinguere target vicini
 - Incapacità di misura precisa delle distanze

Risoluzione in aria

La risoluzione massima risulta di circa 10 cm in aria, inadeguata allo scopo di rilevare stratificazioni sottili



Algoritmi di super-risoluzione

Permettono di superare i limiti sulla risoluzione spettrale imposti dall'analisi “classica” con DFT del segnale ottenuto dal radar

- Parametrici
 - Sfruttano delle conoscenze a priori sul segnale
- Non parametrici
 - Nessuna conoscenza a priori

Algoritmi parametrici : Analisi Baesiana del segnale

$$s(f) = \sum_{k=1}^K [A_k \cos(\omega d_k) + B_k \sin(\omega_k d_k)]$$

$$p(\delta|D, I) \propto p(\delta|I)p(D|\delta, I)$$

δ Set of target distances $\{d_k\}$

$$p(\{d_k\}|D, I) \propto \left[1 - \frac{m \langle h^2 \rangle}{N \langle D^2 \rangle} \right]^{\frac{m-N}{2}}$$

$$\langle h^2 \rangle = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m h_j^2$$

$$s(f) = \sum_{j=1}^m C_k H_k(\omega, \{d_k\})$$

Algoritmi parametrici : Analisi Baesiana del segnale

L'algoritmo si presta ad una procedura di de-tranding che permette di eliminare iterativamente dal segnale le armoniche ottenute dall'analisi per 2 componenti ed individuare così componenti spettrali sotto-risoluzione corrispondenti a target vicini

Dal punto di vista operativo:

- Assunzione numero di componenti armoniche (2) e dizionario distanze
- Massimizzazione probabilità
- Rimozione armoniche

Algoritmi non parametrici: FOCUS

$$Ax = b$$

$$A \in \mathbb{C}^{m \times n}, \quad m < n$$

$$x \in \mathbb{C}^n$$

$$b \in \mathbb{C}^m$$

$$x = A^+ b$$

$$A^+ = A^H (AA^H)^{-1}$$



$$x = W (AW)^+ b$$

$$\text{find } x = Wq$$

where $q : \min \|q\|$, subject to $AWq = b$

Altri algoritmi non parametrici

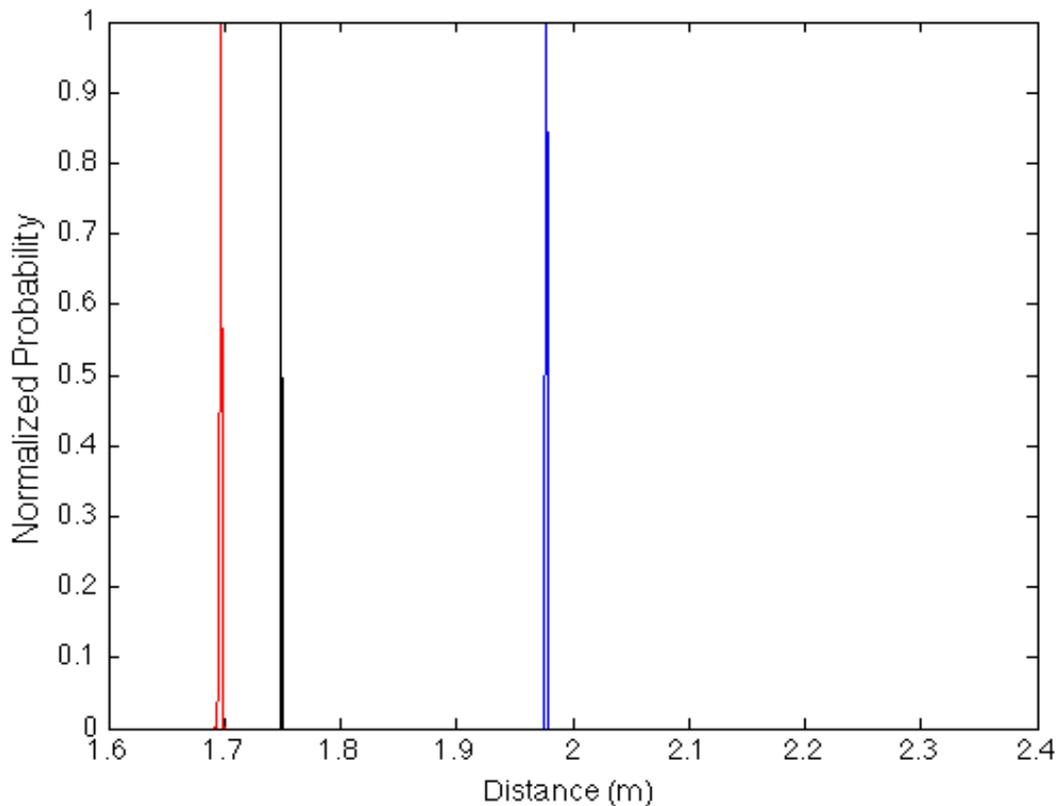
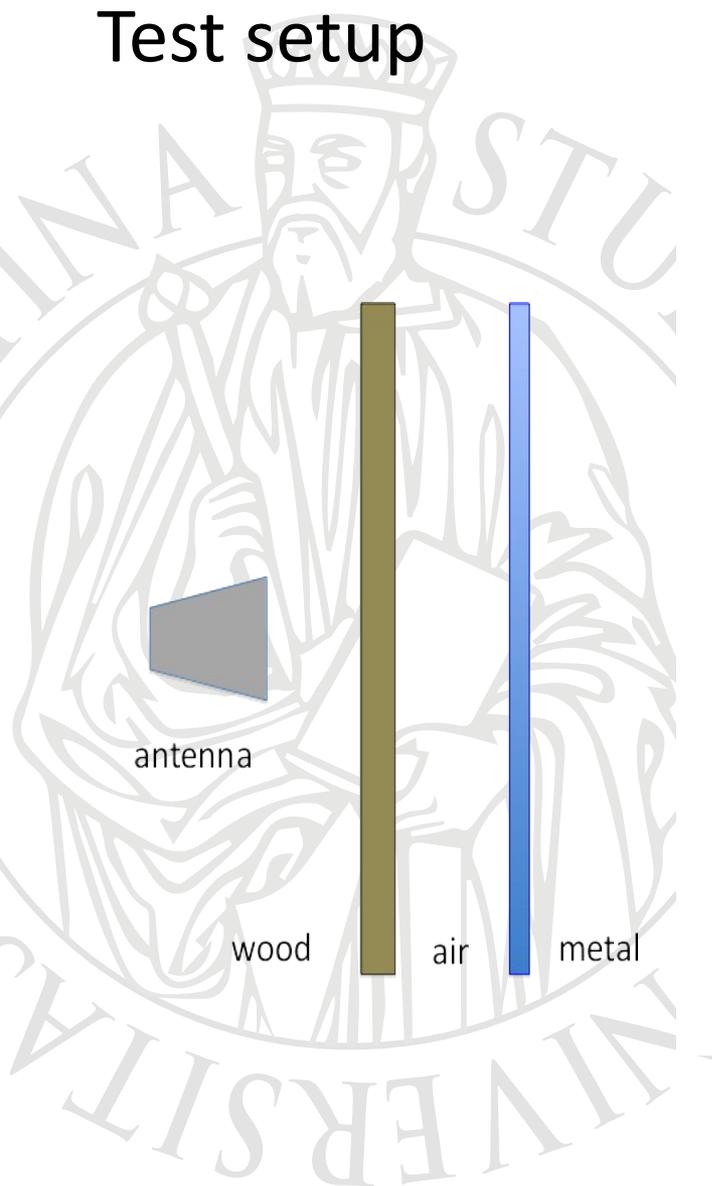
Basis Pursuit

$$\min_x \|x\|_1 \quad \text{subject to} \quad y = Ax.$$

- ARMA

$$X_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i}.$$

Test setup



Problemi di ordine pratico

- Clutter ambientale e dovuto al sistema radar
- Direttività antenna

Work in progress

- Test su pareti artificiali di cartongesso e legno per applicazioni industriali legate alla sicurezza
- Imaging?

Riferimenti bibliografici

- SUSI Elab Scientific
- Progetto RIMIDIA
- Motorola - AN535 PLL design fundamentals
- ANALOG DEVICES - Fundamentals on PLL
- Clock, Jitter and Phase Noise Conversion - AN 3339 - Maxim
- Power Detection and Control For Mobile Handset Applications
- Alpha APN1014 - A Level Detector Design for Dual-Band GSM-PCS Handsets
- BAT62 shottky diode
- RF log detectors theory (AD8307 datasheet, pgg 7 to 10)
- MAXIM - Clock, jitter and phase noise conversion
- ADF4350 datasheet
- AD8302 datasheet
- SiversIMA – FMCW transceiver - <http://www.siversima.com/products/fmcw-transceivers/>
- G.LarryBretthorst, "Bayesian Spectrum Analysis and Parameter Estimation", Springer-Verlag, 1998 (ISBN 0-387-96871-7)
- I. F. Gorodnitsky, B. D. Rao, "Sparse Signal Reconstruction from Limited Data Using FOCUSS: A Re-weighted Minimum Norm Algorithm" - IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 45, NO. 3, MARCH 1997

A large, faint watermark of the University of Florence seal is visible in the background, featuring the same seated figure and text as the official logo.

Grazie per l'attenzione