



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DINFO
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

Modern Microwave Designs for Wireless Communication and Sensing Systems

Stefano Maddio

stefano.maddio@unifi.it

Department of Information Engineering
University of Florence

Firenze, 15 Ottobre 2018

Sommario

- 1 Breve Biografia
- 2 Didattica
Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche
Sistemi di Antenne
- 3 Campi di Ricerca
Antenne per Wireless Sensor Network
Radiolocalizzazione
Cancellazione di autointerferenza
- 4 Ringraziamenti



Breve biografia

- **28.04.2005** Conseguimento della Laurea con una tesi intitolata **Sviluppo e analisi della stabilità di un metodo dei momenti nel dominio del tempo applicato a strutture filari e planari complesse**;
- **29.06.2009** Conseguimento del Dottorato **RF, Microonde ed Elettromagnetismo** con una tesi intitolata **Circularly Polarized Smart Antennas for Wireless Sensor Network Devices**;
- **01.11.2017** Presa di servizio come ricercatore RTD-A presso il dipartimento di ingegneria dell'informazione;
- **12.07.2018** Conseguimento abilitazione per seconda fascia nel settore ING-INF 002, con validità fino al **12.07.2024**.



Breve biografia

- Membro della **IEEE dal 2008**;
- Attualmente, indice di **Hirsch pari a 11** (...quasi 12 ...);
- Produzione scientifica che ammonta a 63 pubblicazioni di cui 28 su rivista;
- Numero di citazioni a quota 360;
- Membro dell'editorial Board della rivista **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**.





Breve biografia

Recentemente, l'articolo **Car Talk: Technologies for Vehicle-to-Roadside Communications**, da me cofirmato, è stato giudicato il miglior articolo dell'anno 2016 su **IEEE Microwave Magazine**.



Didattica

Negli anni, i miei interessi didattici si sono concentrati su

- 1 Lezioni tematiche sulla progettazione e realizzazione di filtri a RF nell'ambito dei corso **Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche**;
- 2 Seminari e lezioni tematiche sulla realizzazione delle antenne stampate nell'ambito dei corso **Sistemi di Antenne**;
- 3 Lezioni propedeutiche di caratterizzazione circuitale a microonde per il corso **Elettronica dei Sistemi a Radiofrequenza**;
- 4 Richiami di propagazione e funzionamento delle antenne per **Tecnologie e Sistemi per Applicazioni Wireless**;
- 5 Nel 2016 ho inoltre tenuto un corso di dottorato sui temi della localizzazione in ambienti al chiuso, dal titolo **Introduction to Indoor Wireless Positioning System**, argomento di crescente importanza sia in ambito scientifico che industriale;
- 6 Dal 2018 tengo il corso di **bioelettromagnetismo**.



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche

Corso del III anno di Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni, primo semestre, 6CFU, tenuto dal prof. **Stefano Selleri**.

Prerequisiti:

- **Campi elettromagnetici**, Il anno, secondo semestre, 6CFU
- Equazioni di Maxwell, Onde Piane, Linee di Trasmissione, Antenne Elementari

Competenze acquisite:

- Propagazione guidata
- Tecniche numeriche

Obiettivi:

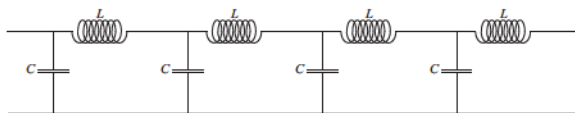
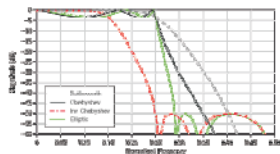
- Portare lo studente ad essere in grado di applicare le conoscenze teoriche acquisite al progetto di un dispositivo passivo a costanti distribuite, arrivando fino alla realizzazione e misura.



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche

Progetto Matlab

Il progetto prevede di partire dal filtro prototipo (di Butterworth, di Tchebyshev o di Cauer), per pervenire a una rete a scala LC e, da questa, a una implementazione a costanti distribuite, del tipo *stepped impedance* o più sofisticata.



Stepped Impedance



Stub and Step



Kuroda

Tutta questa parte viene sviluppata da zero in laboratorio.

Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche

Verifica Full Wave

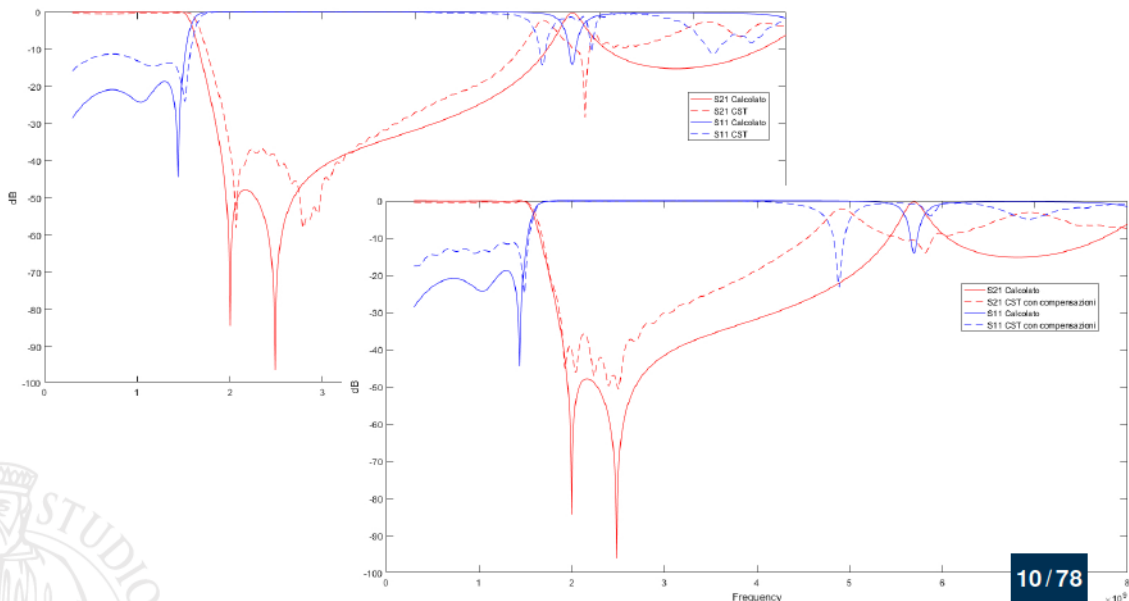
Il filtro a costanti distribuite in microstriscia viene quindi simulato con un CAD full-wave commerciale (CST Microwave Studio).



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche

Verifica Full Wave

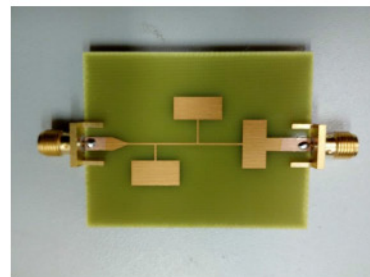
L'analisi Full-Wave ha lo scopo principale di far apprezzare l'effetto delle discontinuità e comprendere i necessari passi correttivi.



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche

Realizzazione

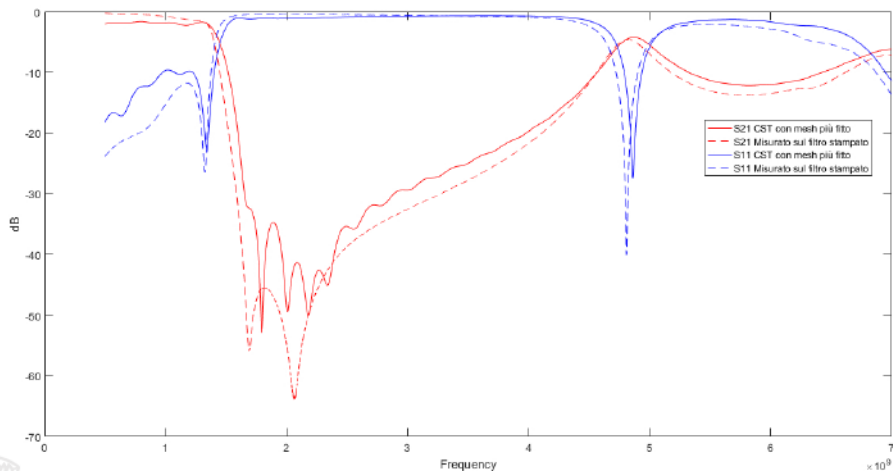
Infine il progetto viene realizzato tramite processo elettrochimico, quindi connettorizzato e infine misurato.



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche

Misure

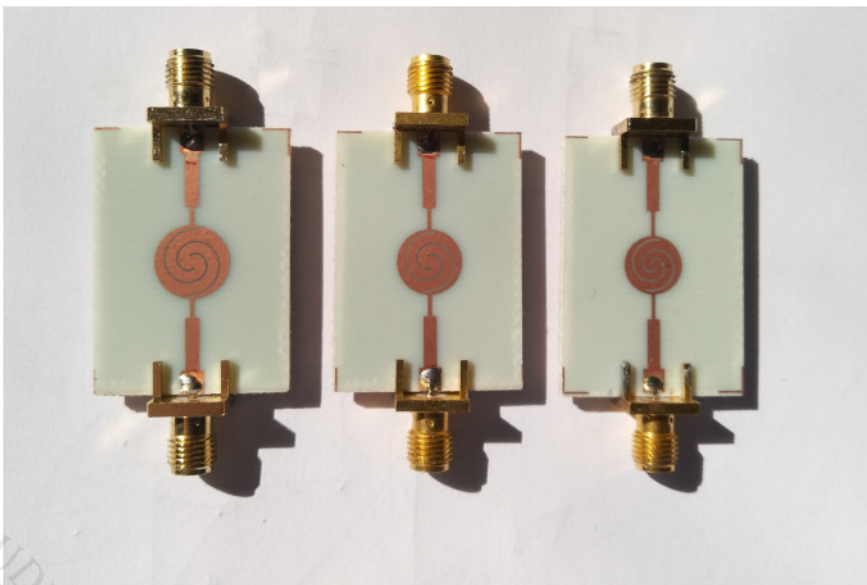
Le misure tramite Keysight 5242A Vector Network Analyser sono infine confrontate con le simulazioni e discusse



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche

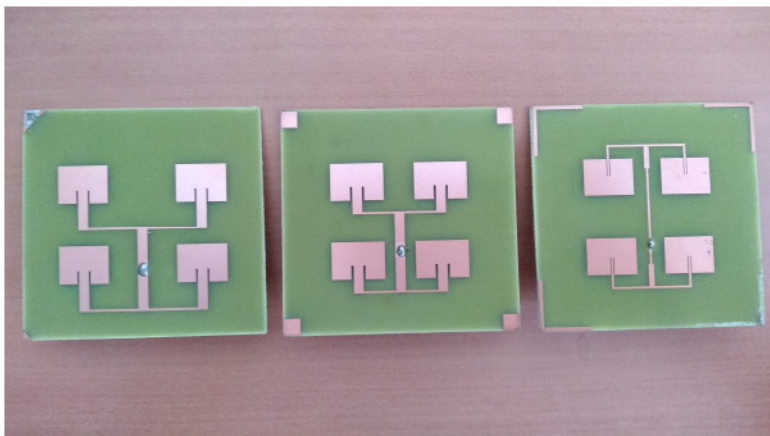
Ricadute per la ricerca

Come ricaduta, queste attività hanno portato alla ricerca su filtri e altri dispositivi passivi guidati.



Sistemi di Antenne

In modo molto simile, nel corso di **Sistemi di Antenne**, tenuto dal prof. **Giuseppe Pelosi**, gli studenti hanno portato avanti un progetto personale.



In questo caso, l'elaborato è un piccolo array di antenne, realizzate mettendo in pratica le competenze acquisite durante il corso.

Sistemi di Antenne

Misure

La caratterizzazione sperimentale avviene in una struttura presente in dipartimento. Negli anni ho contribuito a mettere a punto il setup di misura.



Sistemi di Antenne

Misure

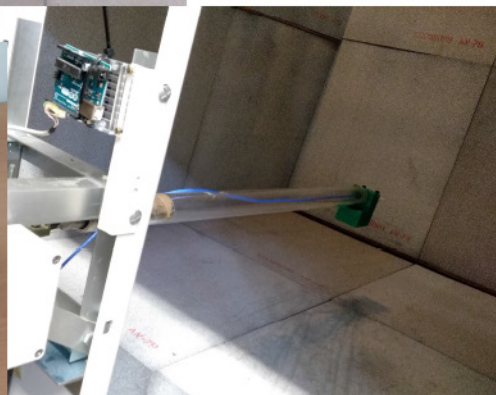
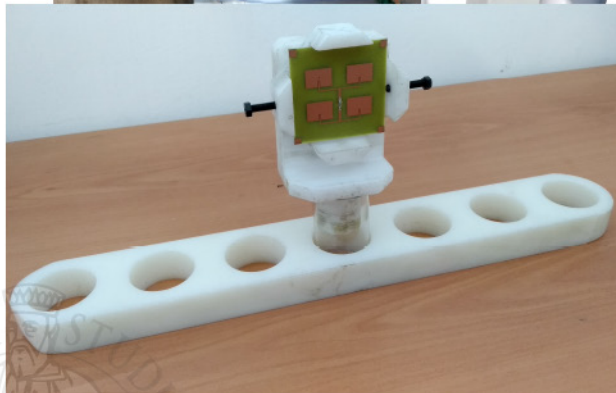
La caratterizzazione sperimentale avviene in una struttura presente in dipartimento. Negli anni ho contribuito a mettere a punto il setup di misura.



Sistemi di Antenne

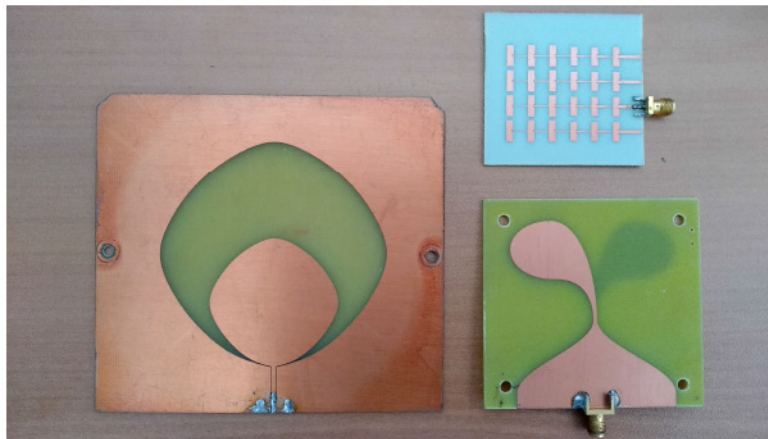
Misure

La caratterizzazione sperimentale avviene in una struttura presente in dipartimento. Negli anni ho contribuito a mettere a punto il setup di misura.



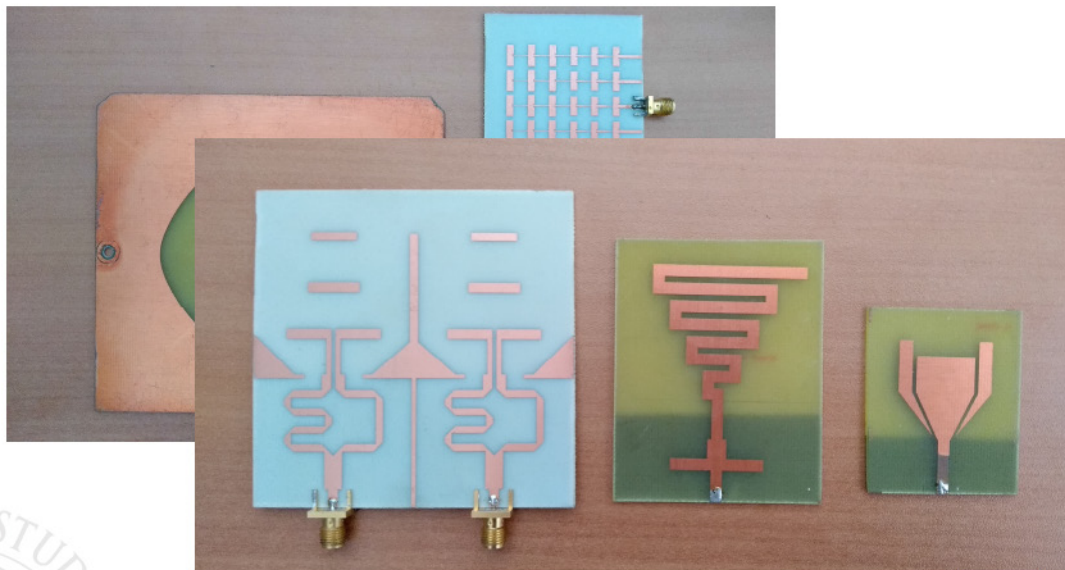
Sistemi di Antenne

Di nuovo, le attività didattiche hanno alimentato temi di ricerca. In questo caso sulle antenne stampate.



Sistemi di Antenne

Di nuovo, le attività didattiche hanno alimentato temi di ricerca. In questo caso sulle antenne stampate.



Campi di Ricerca

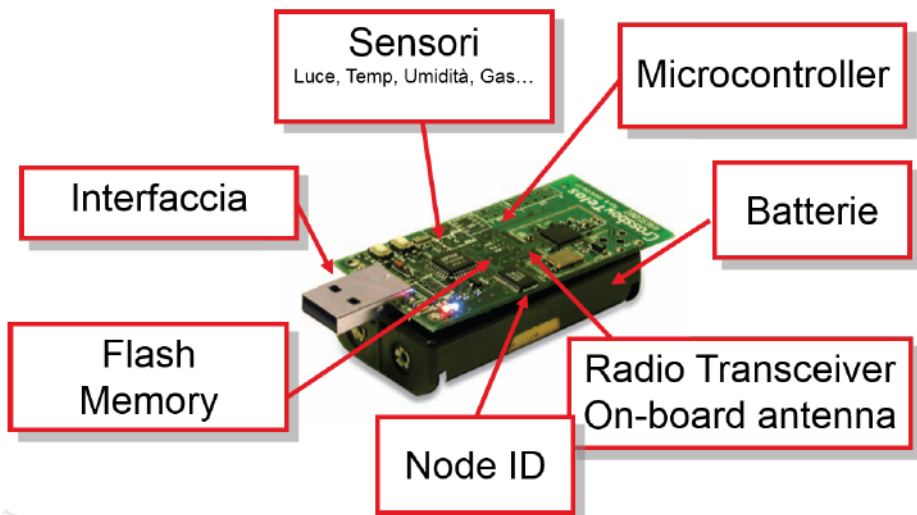
I miei interessi si concentrano nel campo dei **dispositivi a microonde**, per uso nei moderni sistemi di comunicazione e di rilevazione.

- 1 **Antenne per Wireless Sensor Network;**
- 2 **Sistemi di Localizzazione Indoor;**
- 3 **Antenne e array di antenne per applicazioni industriali d'avanguardia;**
- 4 **Dispositivi passivi e semi-passivi a radiofrequenza e a microonde;**
- 5 **Cancellatori di interferenza;**
- 6 **Electronically Scanned Array.**



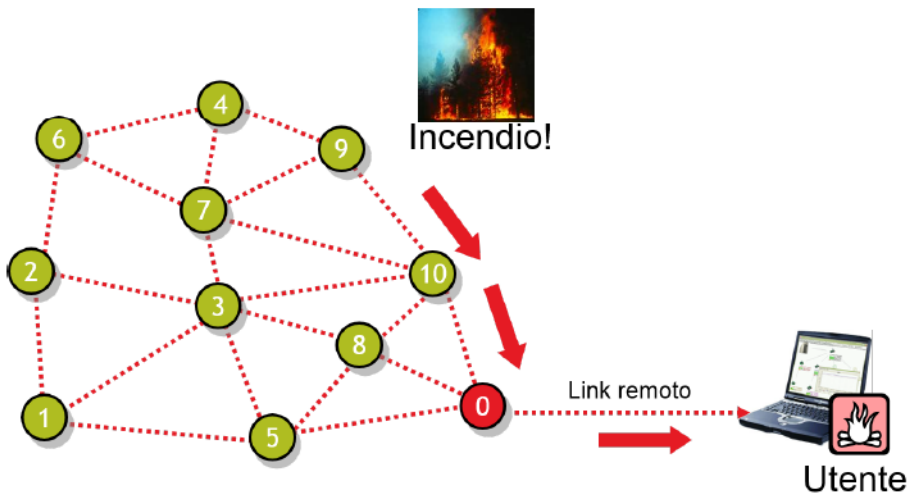
Antenne per Wireless Sensor Network

Mi interesse di problemi di antenne per **wireless sensor network** fin dal dottorato. L'idea di base è stata quella di sviluppare un nodo **universale** per le comunicazioni tra nodi di sensori.



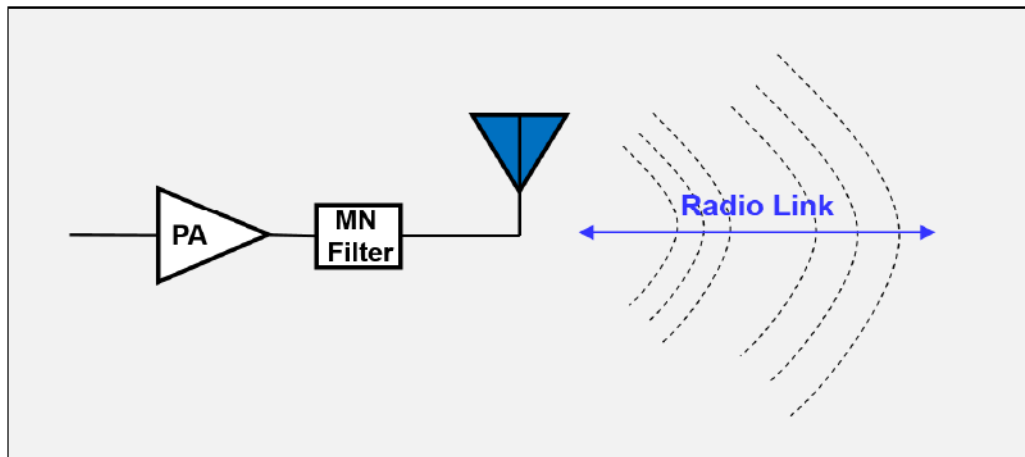
Antenne per Wireless Sensor Network

Mi interesso di problemi di antenne per **wireless sensor network** fin dal dottorato. L'idea di base è stata quella di sviluppare un nodo **universale** per le comunicazioni tra nodi di sensori.



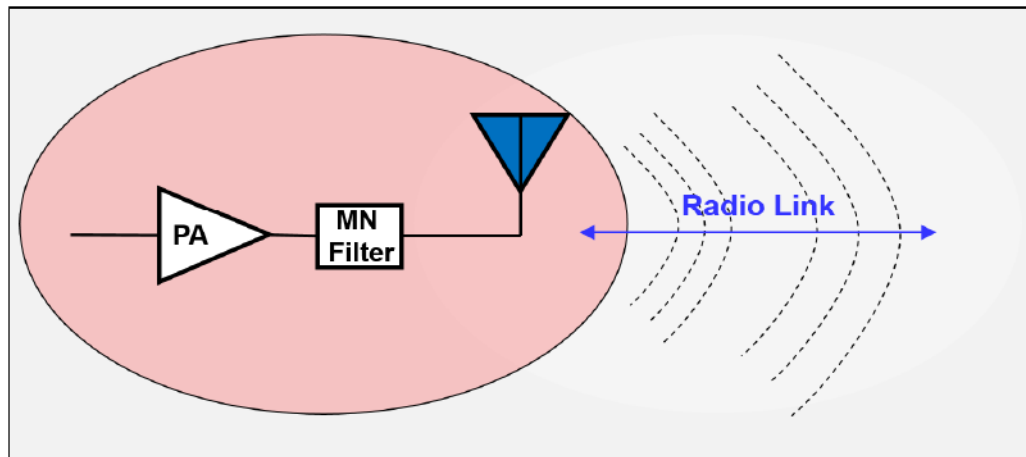
Antenne per Wireless Sensor Network

Mai come in questo campo, un'antenna deve conciliare la sua natura di trasduttore tra **il mondo condotto** e **il mondo radiato**.



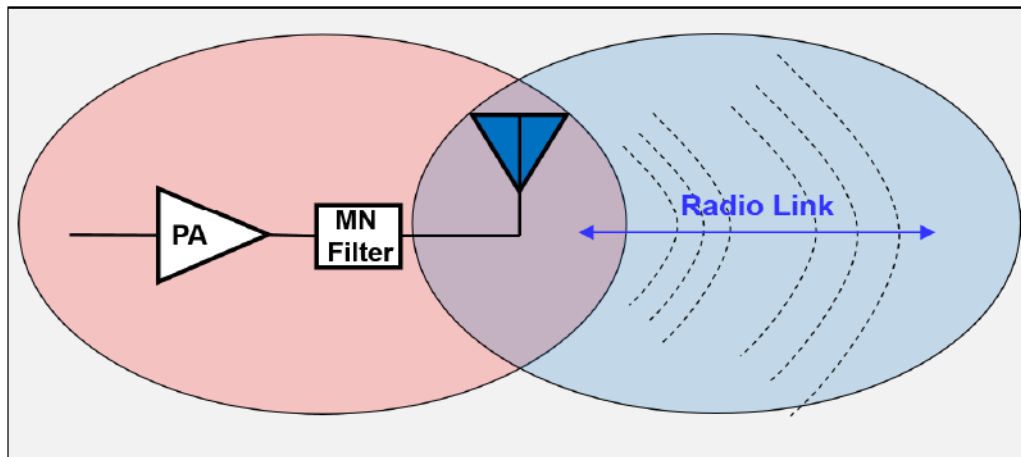
Antenne per Wireless Sensor Network

Mai come in questo campo, un'antenna deve conciliare la sua natura di trasduttore tra **il mondo condotto** e **il mondo radiato**.



Antenne per Wireless Sensor Network

Mai come in questo campo, un'antenna deve conciliare la sua natura di trasduttore tra **il mondo condotto** e **il mondo radiato**.



Antenne per Wireless Sensor Network

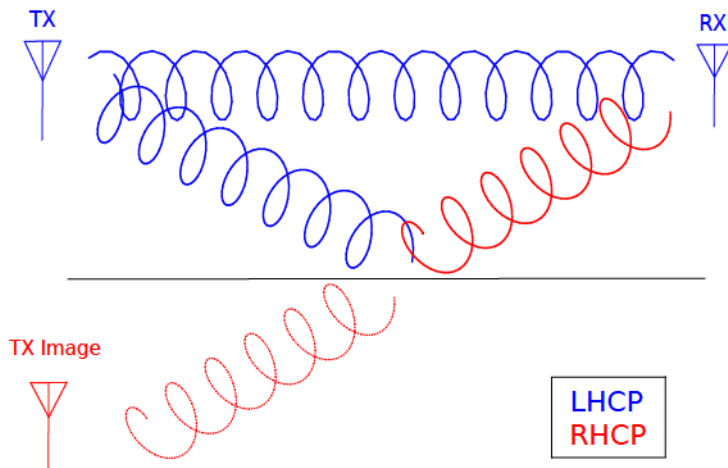
Per essere universale, il nodo deve avere un'antenna in grado di **comunicare ovunque e comunque**. In questo senso, negli anni è stata sviluppata un'antenna strutturata come un guscio, che protegge il nodo e che gli permette di **comunicare in ogni condizione**.



Antenne per Wireless Sensor Network

Per rendere la comunicazione universale, queste antenne operano in **polarizzazione circolare, (CP)**. Questo meccanismo radiativo permette di

- 1 comunicare indipendentemente dall'orientamento relativo di sorgente e destinazione;
- 2 mitigare il fenomeno del **multipath** in ambienti complessi.

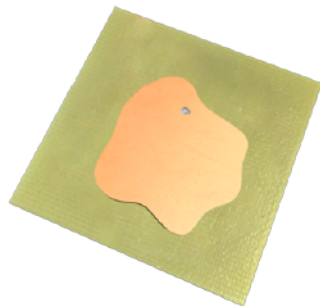


Antenne per Wireless Sensor Network

Antenne stampate

Un'antenna stampata si compone di una **patch metallica** (radiatore) depositata su di un substrato dielettrico, supportato da un piano di massa. la sua polarità è dovuta a:

- basso costo, leggerezza, conformabilità;
- compatibilità con processi PCB;
- versatilità di polarizzazione, di frequenza;
- facilità nell'implementazione di array.



Lo studio di tale struttura è basata su modelli

- **Analitici:** Modello cavità, modello a linea di trasmissione;
- **Numerici:** FEM, MOM, FIT.

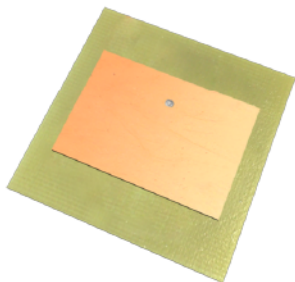
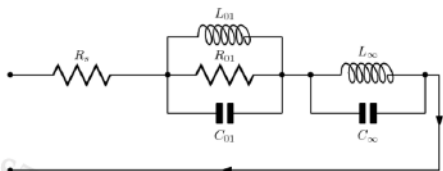
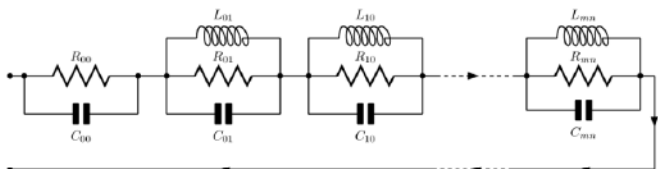
Agastra, E., Dedeban, C., Guarnieri, G., Maddio, S., Pelosi, G., Pichot, C., and Selleri, S. *Space and time basis function design for the method of moments in time-domain analysis of wire and planar structures*, INTERNATIONAL JOURNAL OF RF AND MICROWAVE COMPUTER-AIDED ENGINEERING, vol. 21, no.5, pp.551–559, 2011.

Antenne per Wireless Sensor Network

Antenne stampate

Circuitualmente, l'antenna a patch può essere vista come una **serie infinita di risuonatori RLC paralleli**, che rappresentano gli infiniti modi di risonanza.

$$Z_{in}(\omega, \mathbf{r}_0) = \sum_{m,n=0}^{\infty} j\omega \frac{\Phi_{m,n}(\mathbf{r}_0) G_{mn}(\mathbf{r}_0)}{\omega_{mn}^2 - (1 - j\delta_{eff})\omega^2} = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{R_{mn}}{1 + jQ_{mn} \left(\frac{\omega}{\omega_{mn}} - \frac{\omega_{mn}}{\omega} \right)}$$

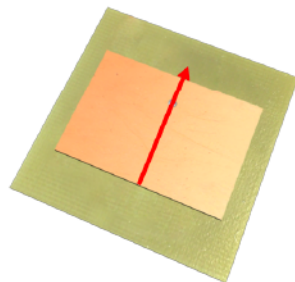
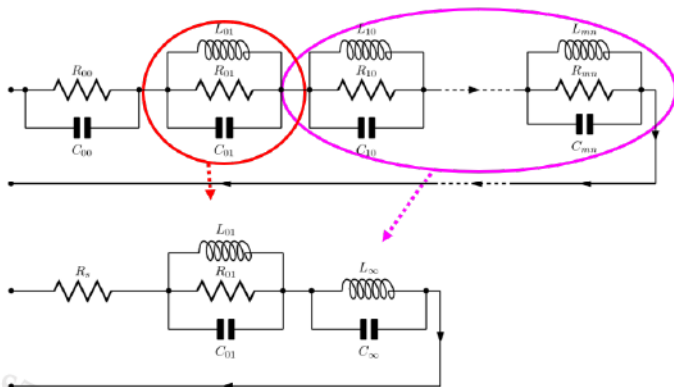


Antenne per Wireless Sensor Network

Antenne stampate

Circuitalmente, l'antenna a patch può essere vista come una **serie infinita di risuonatori RLC paralleli**, che rappresentano gli infiniti modi di risonanza.

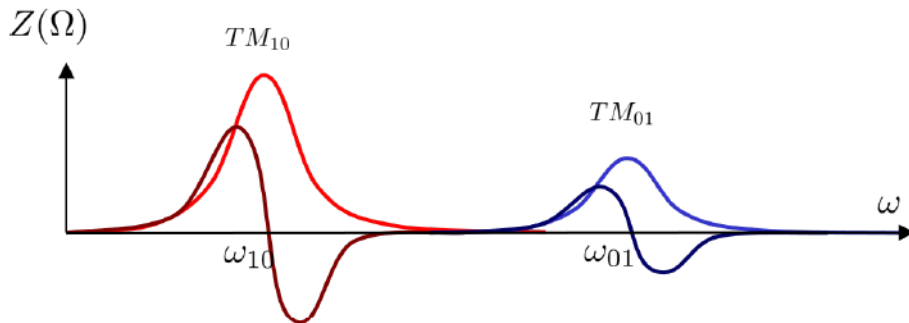
$$Z_{in}(\omega, \mathbf{r}_0) = \sum_{m,n=0}^{\infty} j\omega \frac{\Phi_{m,n}(\mathbf{r}_0) G_{mn}(\mathbf{r}_0)}{\omega_{mn}^2 - (1 - j\delta_{eff})\omega^2} = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{R_{mn}}{1 + jQ_{mn} \left(\frac{\omega}{\omega_{mn}} - \frac{\omega_{mn}}{\omega} \right)}$$



Antenne per Wireless Sensor Network

Antenne stampate

Potenzialmente, ogni modo può essere eccitato, ma di fatto questo dipende dalla posizione dell'alimentazione, oltre che dalla frequenza di lavoro.

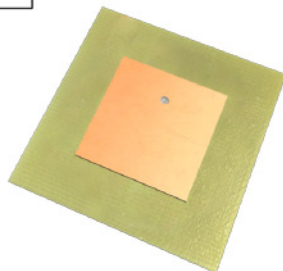
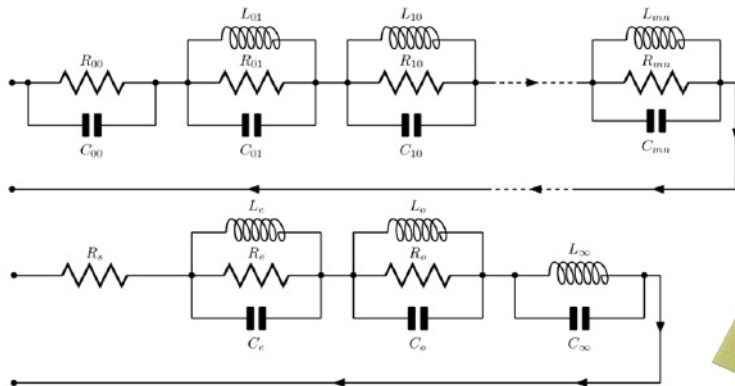


Un modo non può essere eccitato se la posizione del pin corrisponde a uno zero per la funzione modale.

Antenne per Wireless Sensor Network

Antenne stampate

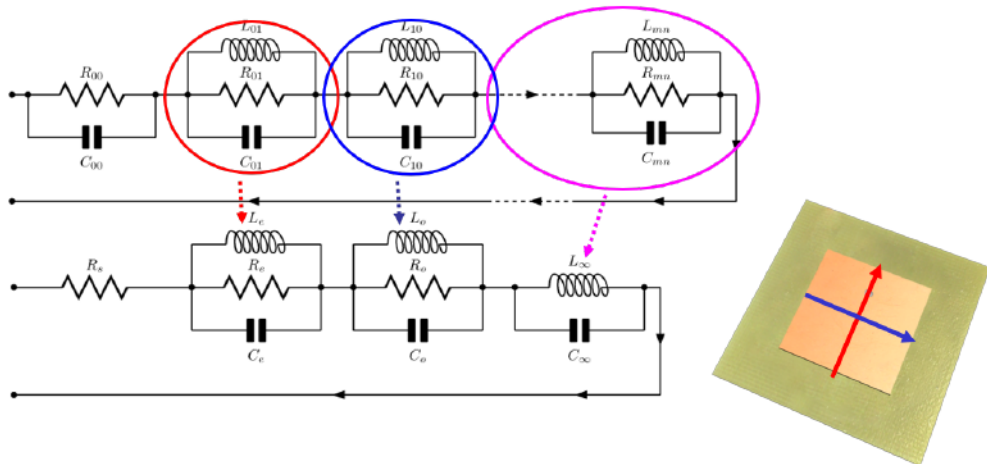
Si ottiene polarizzazione circolare quando due modi **degeneri e ortogonali** vengono eccitati contemporaneamente in **quadratura**.



Antenne per Wireless Sensor Network

Antenne stampate

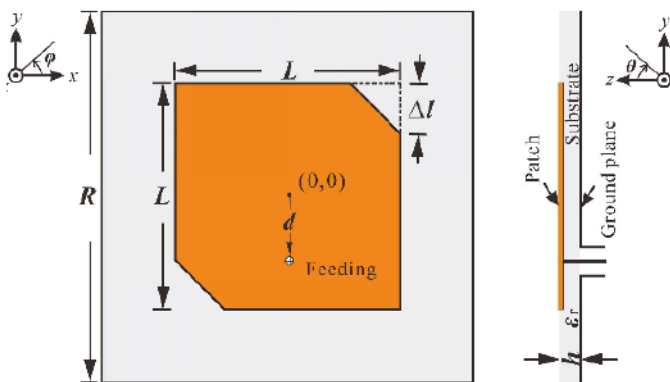
Si ottiene polarizzazione circolare quando due modi **degeneri e ortogonali** vengono eccitati contemporaneamente in **quadratura**.



Antenne per Wireless Sensor Network

Antenne stampate

Canonicamente, un design classico per un'antenna a patch che operi in CP, è il **truncated corner square**:



Tuttavia, questo design **manca di versatilità**; inoltre i **design principles** classici non ci sono parsi del tutto convincenti, pertanto si è cercato delle alternative.

Antenne per Wireless Sensor Network

Design principle innovativo

Si è sviluppato un modo alternativo per trattare il problema del design.

Esprimendo i risuonatori dei modi attivi come:

$$Z_{e,o}(\omega) = R_{e,o} \zeta_{e,o}(\omega) = R_{e,o} \frac{1}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_{e,o}} - \frac{\omega_{e,o}}{\omega} \right)} = R_{e,o} \zeta_{e,o}(\omega)$$

Il problema della sintesi, si traduce nell'imporre **l'impedenza di ingresso**, somma dei modi, **pari al valore di impedenza voluto**.

$$Z_{in} = Z_e + Z_o = R_e \zeta_e(\omega) + R_o \zeta_o(\omega) = R_N + jX_N$$

contemporaneamente alle **condizioni di quadratura**, date dal rapporto:

$$\frac{Z_o(\omega)}{Z_e(\omega)} = \frac{R_o \zeta_o(\omega)}{R_e \zeta_e(\omega)} = \frac{R_o}{R_e} \frac{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_e} - \frac{\omega_e}{\omega} \right)}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)} = 1 \exp(j\pi/2)$$

che tipicamente si vuole pari **all'unità immaginaria complessa**.

S. Maddio, A. Cidronali, G. Manes, *A new design method for single-feed circular polarization microstrip antenna with an arbitrary impedance matching condition*, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, vol. 59, pp. 379-389, 2011.

Antenne per Wireless Sensor Network

Design principle innovativo

Definita la funzione $\beta_\zeta(\omega)$ come rapporto modale normalizzato:

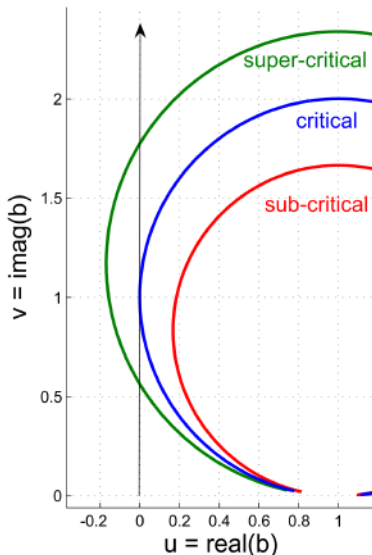
$$\beta_\zeta(\omega) = \frac{\zeta_o(\omega)}{\zeta_e(\omega)} = \frac{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_e} - \frac{\omega_e}{\omega}\right)}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)} = u_\beta + jv_\beta$$

si osserva che questa ha un supporto che descrive una curva **approssimabile ad un cerchio**:

$$\begin{cases} u_\beta = 1 - A\sin(\varphi) \\ v_\beta = A - A\cos(\varphi) \end{cases}$$

dove A e φ sono **funzioni dei parametri modali**

$$\begin{cases} A(\omega) = Q\frac{\omega_o - \omega_e}{2\omega_c} \left(\frac{\omega}{\omega_c} + \frac{\omega_c}{\omega} \right) = \frac{A_c}{2} \left(\frac{\omega}{\omega_c} + \frac{\omega_c}{\omega} \right) \\ \varphi(\omega) = \pi + 2\operatorname{atan} \left[Q \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right) \right] \end{cases}$$



Antenne per Wireless Sensor Network

Design principle innovativo

Il problema della sintesi può adesso essere risolto in forma chiusa. Dopo aver definito il parametro

$$v = \frac{R_N - X_N}{R_N + X_N}$$

È sufficiente scegliere le **impedenze modali** pari a:

$$\begin{cases} R_e = \frac{R_N^2 + X_N^2}{R_N + X_N} \\ R_o = \frac{1}{v} R_e = \frac{R_N^2 + X_N^2}{R_N - X_N} \end{cases} \quad (1)$$

E di conseguenza, **le frequenze modali** pari a:

$$\begin{cases} \omega_e = \left(\sqrt{1 + \left(\frac{v}{2Q}\right)^2} - \frac{v}{2Q} \right) \omega_0 \approx \left(1 - \frac{v}{2Q}\right) \omega_0 \\ \omega_o = \left(\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2vQ}\right)^2} + \frac{1}{2vQ} \right) \omega_0 \approx \left(1 + \frac{1}{2vQ}\right) \omega_0 \end{cases} \quad (2)$$

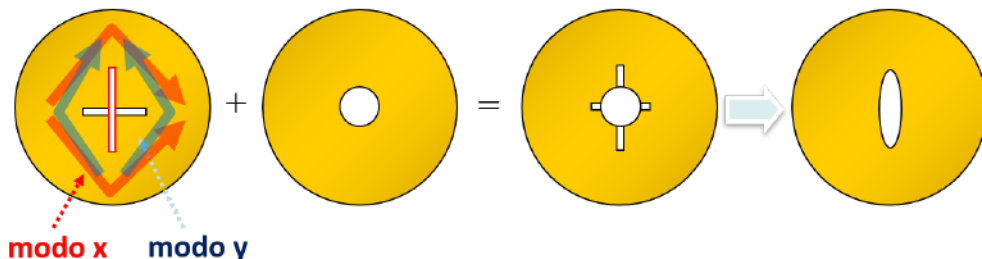
Dove ω_0 è frequenza di progetto.

Il problema diventa quindi scegliere la geometria che disponga dei gradi di libertà adeguati per risolvere questo sotto-problema di sintesi.

Antenne per Wireless Sensor Network

Design principle innovativo

Si è indagato un design compatto, basato sul cerchio, adatto a essere iscritto in un poligono.



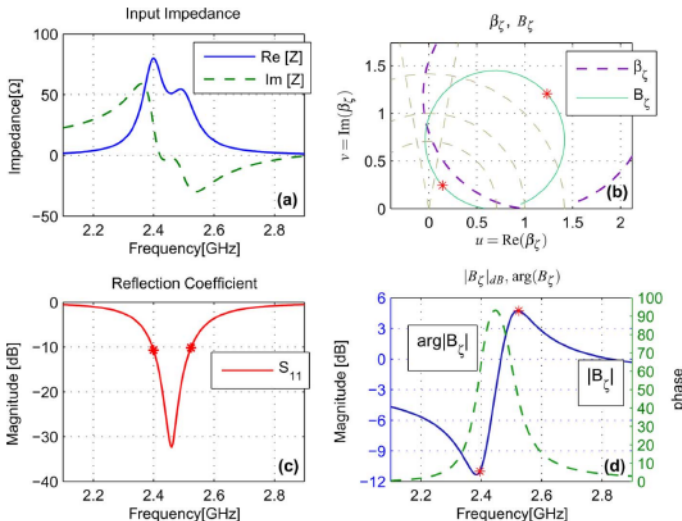
Questo si è rivelato adatto alla manipolazione modale circuitale descritta.

S. Maddio, A. Cidronali, G. Manes, *A new design method for single-feed circular polarization microstrip antenna with an arbitrary impedance matching condition*, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, vol. 59, pp. 379-389, 2011.

Antenne per Wireless Sensor Network

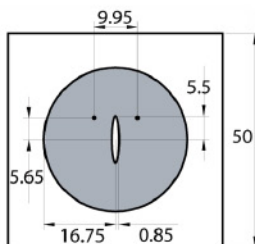
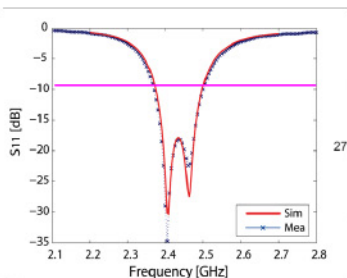
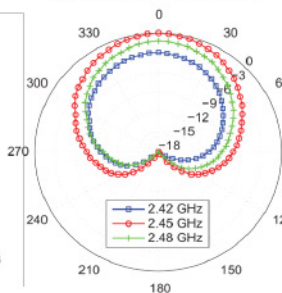
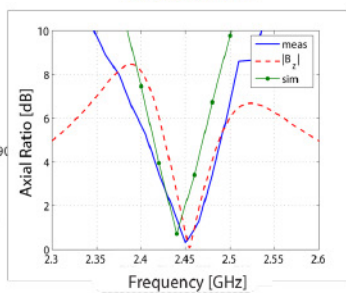
Design principle innovativo

Si è quindi sviluppato un codice MATLAB che fornisce **quadro sinottico** delle caratteristiche della patch, monitorando al contempo la polarizzazione e l'impedenza di ingresso.



Antenne per Wireless Sensor Network

Prototipo e caratterizzazione sperimentale

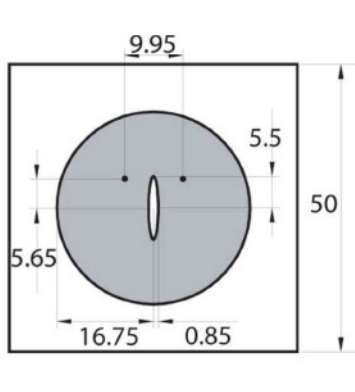

Return Loss

Measured Pattern

Axial Ratio


S. Maddio, A. Cidonali, G. Manes, *A new design method for single-feed circular polarization microstrip antenna with an arbitrary impedance matching condition*, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, vol. 59, pp. 379-389, 2011.

Antenne per Wireless Sensor Network

Evoluzione dell'antenna elementare

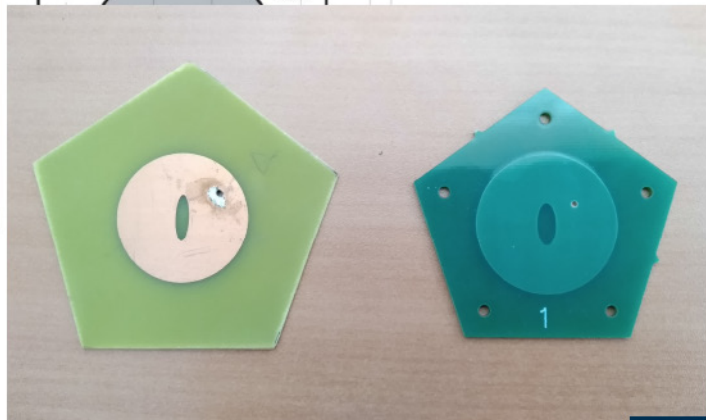
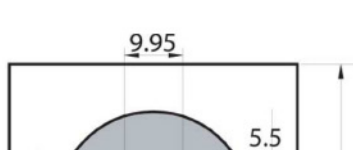
Negli anni, sono stati sviluppati vari prototipi



Antenne per Wireless Sensor Network

Evoluzione dell'antenna elementare

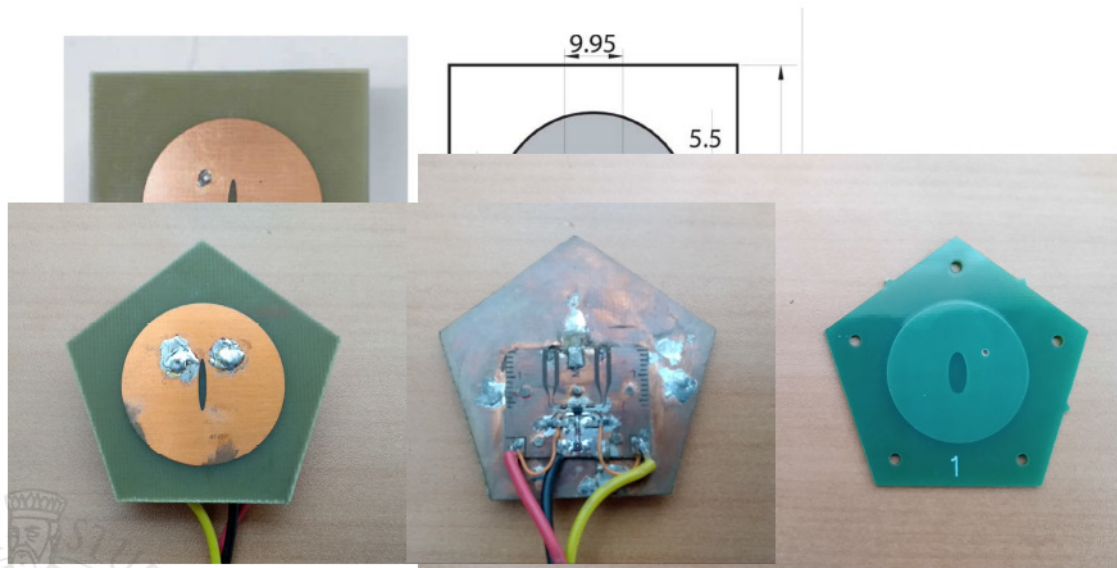
Negli anni, sono stati sviluppati vari prototipi



Antenne per Wireless Sensor Network

Evoluzione dell'antenna elementare

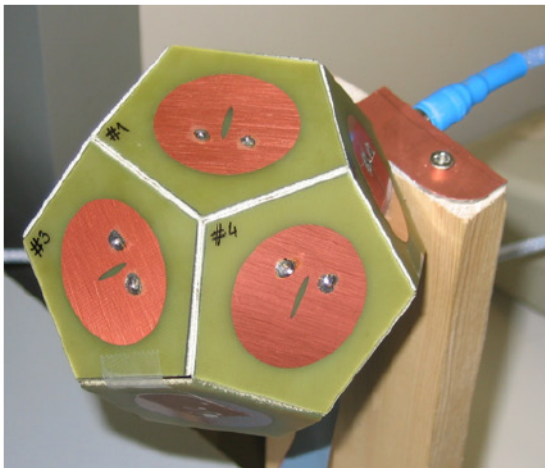
Negli anni, sono stati sviluppati vari prototipi



Antenne per Wireless Sensor Network

Assemblaggio del nodo sensore

Sono stati assemblati vari nodi *sferici*, o per essere esatti, di **forma dodecaedrica**; un buon compromesso tra numero di facce e copertura, considerando il pattern della singola patch.

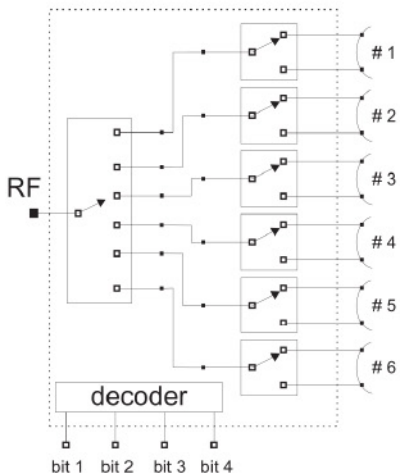
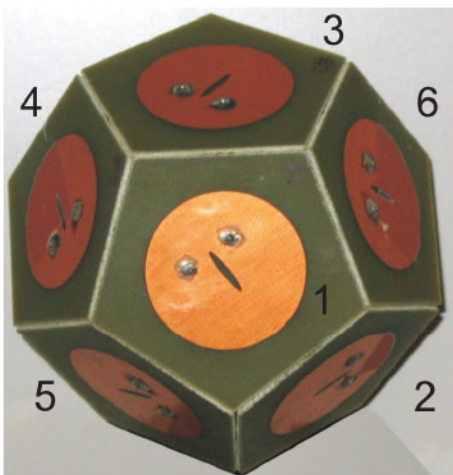


S. Maddio, A. Cidronali, G. Manes, *Analysis and performance of a smart antenna for 2.45-GHz single-anchor indoor positioning*, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, vol. 58, pp. 21–31, 2010.

Antenne per Wireless Sensor Network

Assemblaggio del nodo sensore

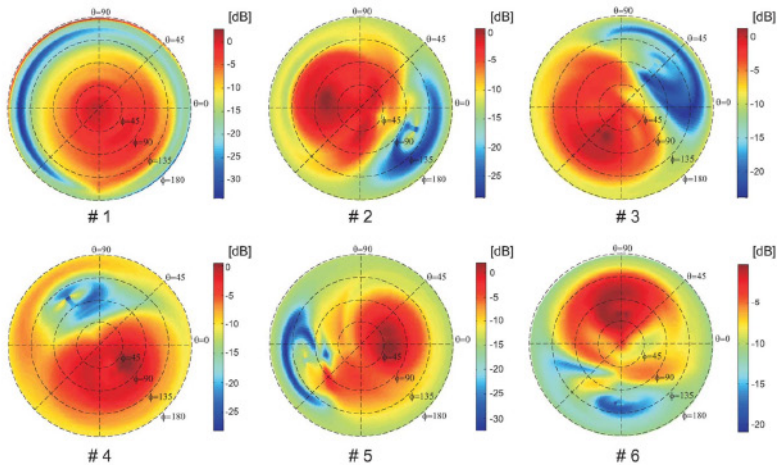
Sono stati assemblati vari nodi *sferici*, o per essere esatti, di **forma dodecaedrica**; un buon compromesso tra numero di facce e copertura, considerando il pattern della singola patch.



Antenne per Wireless Sensor Network

Misure

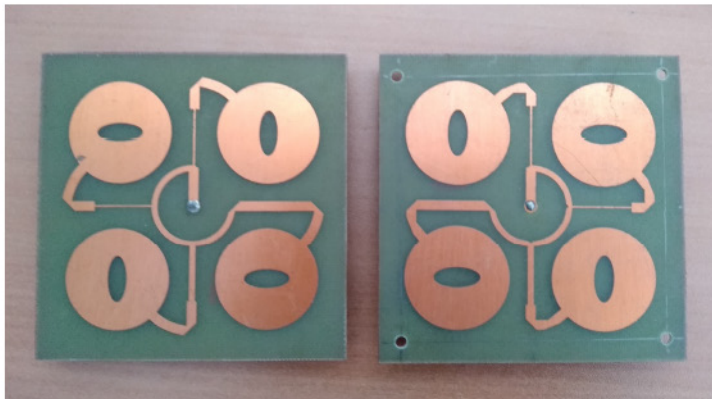
La struttura risultante è stata sottoposta a misure, dimostrando la validità dei presupposti, ovvero la capacità di comunicazione in modo settorializzato e in polarizzazione circolare.



Antenne per Wireless Sensor Network

Architettura Sequenziale

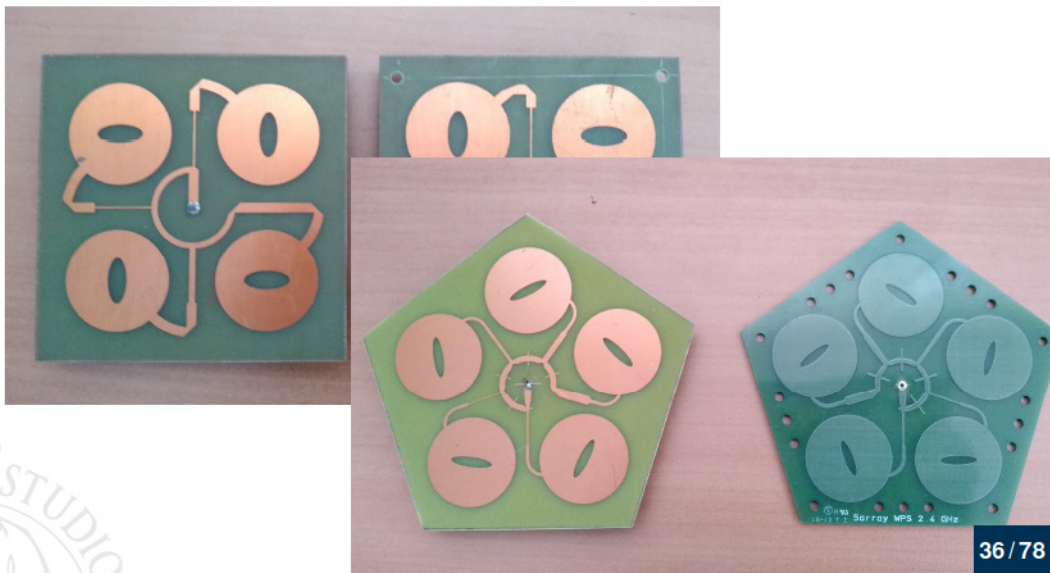
Combinando più antenne in un'architettura sequenziale, si rafforza la **purezza di polarizzazione** oltre che il guadagno, come avviene per un array ordinario. Molte varianti sono state realizzate applicando questo principio:



Antenne per Wireless Sensor Network

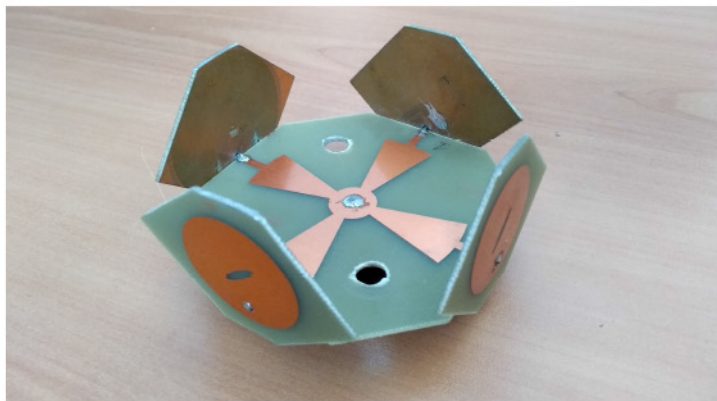
Architettura Sequenziale

Combinando più antenne in un'architettura sequenziale, si rafforza la **purezza di polarizzazione** oltre che il guadagno, come avviene per un array ordinario. Molte varianti sono state realizzate applicando questo principio:



Antenne per Wireless Sensor Network

Altre antenne...



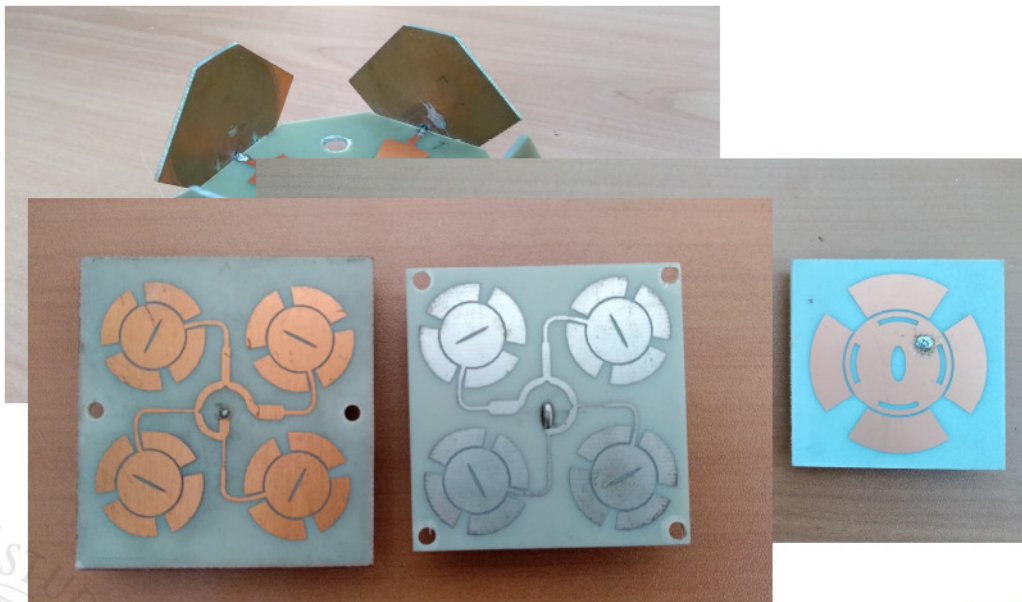
Antenne per Wireless Sensor Network

Altre antenne... altre varianti...



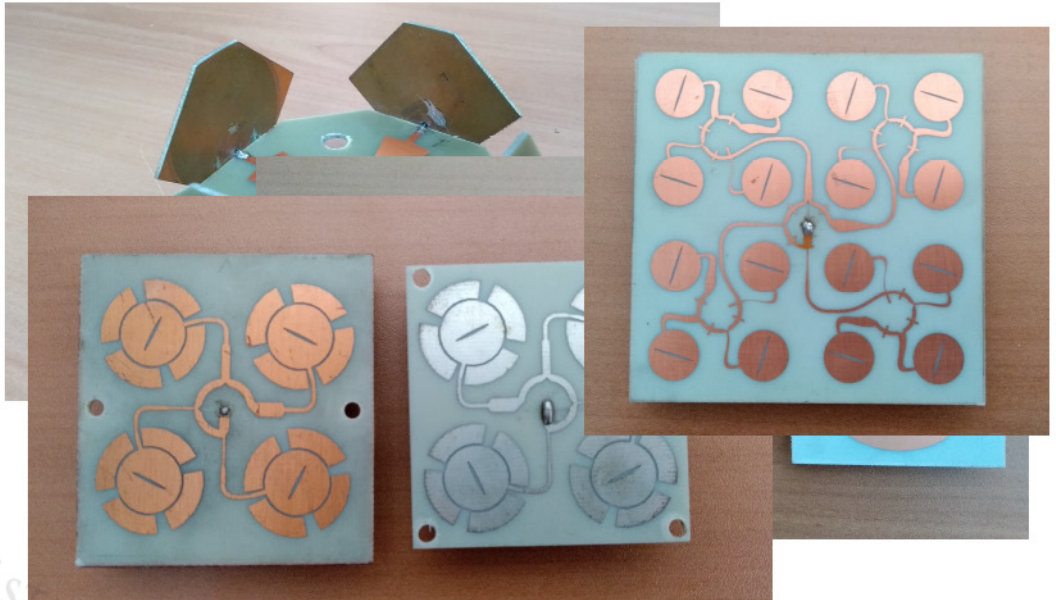
Antenne per Wireless Sensor Network

Altre antenne... altre varianti... ad altre frequenze...



Antenne per Wireless Sensor Network

Altre antenne... altre varianti... ad altre frequenze... in altre configurazioni...



Antenne per Wireless Sensor Network

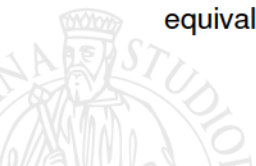
Bibliografia

- Maddio S., Cidronali A. and Manes G., *A new design method for single-feed circular polarization microstrip antenna with an arbitrary impedance matching condition*, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, vol.59, pp.379-389, 2011;
- Agastra, E., Dedebar, C., Guarnieri, G., Maddio, S., Pelosi, G., Pichot, C., and Selleri, S. *Space and time basis function design for the method of moments in time-domain analysis of wire and planar structures*, INTERNATIONAL JOURNAL OF RF AND MICROWAVE COMPUTER-AIDED ENGINEERING, vol. 21, no.5 , pp.551–559, 2011;
- Maddio, S. *A Compact Wideband Circularly Polarized Antenna Array for C-band Applications*, IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTER, vol.14, pp.1081–1084, 2015;
- Maddio, S., Pelosi, G., Righini, M. and Selleri, S. *16-Element circular polarised antenna array based on sequential arrangement of non-identical disc patches*, IET ELECTRONIC LETTERS, vol.54, no.3, pp.113–114, 2017;

Radiolocalizzazione

Mi interesso di problemi di localizzazione indoor da quasi 10 anni:

- 1 Due partecipazioni alla conferenza **Indoor Positioning Indoor Navigation (IPIN)** dedicata espressamente a questi argomenti (2010, 2013);
- 2 Contributo nel testo **Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances**, edito dalla Wiley (2011);
- 3 Demo live ad un Workshop sulla localizzazione nell'ambito della conferenza **International Microwave Symposium** (2012);
- 4 Corso di dottorato **Introduction to Indoor Wireless Positioning System**, sui temi della localizzazione (2016);
- 5 Libro a corredo del corso di dottorato, pubblicato dalla **FUP** (2017);
- 6 Svariati articoli su rivista, tra cui **4 Transaction** e uno su rivista di equivalente impatto.



Radiolocalizzazione

Sfide e opportunità della radiolocalizzazione indoor



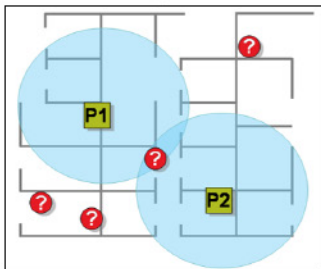
- 1 Context-Aware Applications
- 2 Ubiquitous Computing
- 3 Wireless Sensor Networking
- 4 Asset Management
- 5 In-Building Navigation
- 6 Consumer behavior/ads
- 7 Security
- 8 Safety (First Responders)

Radiolocalizzazione

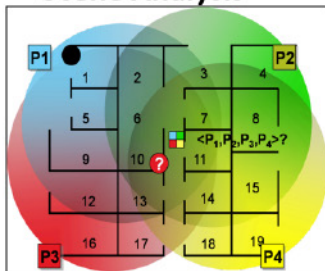
Approcci classici

Range-free

Proximity Based



Scene Analysis

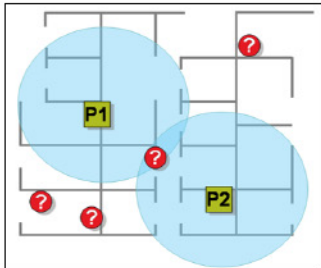


Radiolocalizzazione

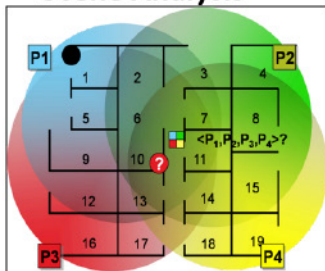
Approcci classici

Range-free

Proximity Based

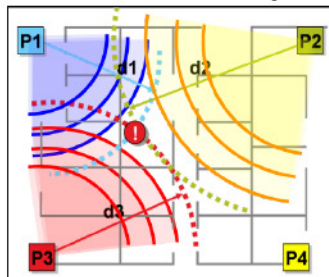


Scene Analysis

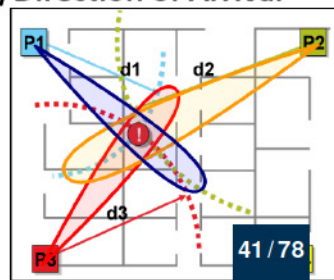


Ranged

Time of Arrival / TDoA

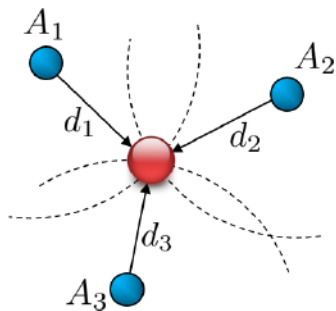


Angle/Direction of Arrival



Radiolocalizzazione

Approcci classici

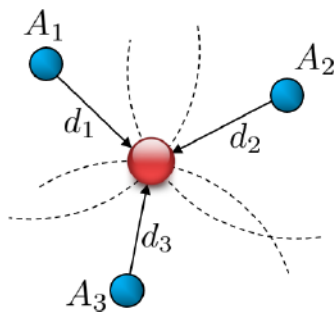


- Distanza d_1 da A_1
- Distanza d_2 da A_2
- Distanza d_3 da A_3

3 distanze, 3 ancore

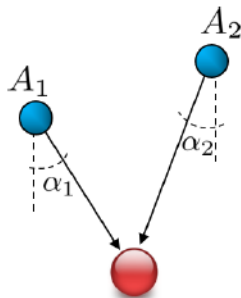
Radiolocalizzazione

Approcci classici



- Distanza d_1 da A_1
- Distanza d_2 da A_2
- Distanza d_3 da A_3

3 distanze, 3 ancore

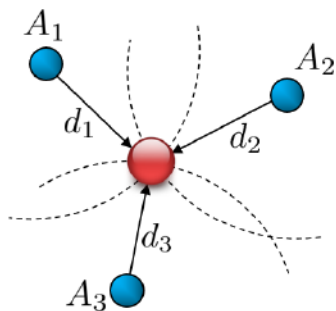


- Angolo α_1 da A_1
- Angolo α_2 da A_2

2 distanze, 2 ancore

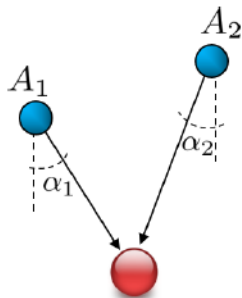
Radiolocalizzazione

Approcci classici



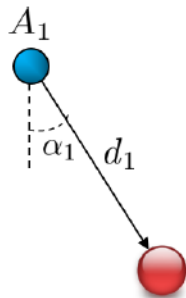
- Distanza d_1 da A_1
- Distanza d_2 da A_2
- Distanza d_3 da A_3

3 distanze, 3 ancore



- Angolo α_1 da A_1
- Angolo α_2 da A_2

2 distanze, 2 ancore



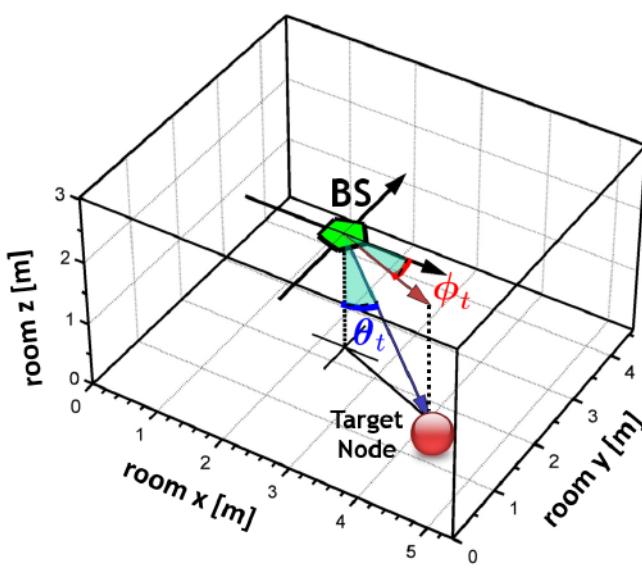
- Distanza d_1 da A_1
- Angolo α_1 da A_1

2 stime, 1 ancore

Radiolocalizzazione

Localizzazione a singola ancora

Caso 3D, ovvero **una singola ancora e nessuna necessità di misure di distanza.**



Radiolocalizzazione

Localizzazione a singola ancora

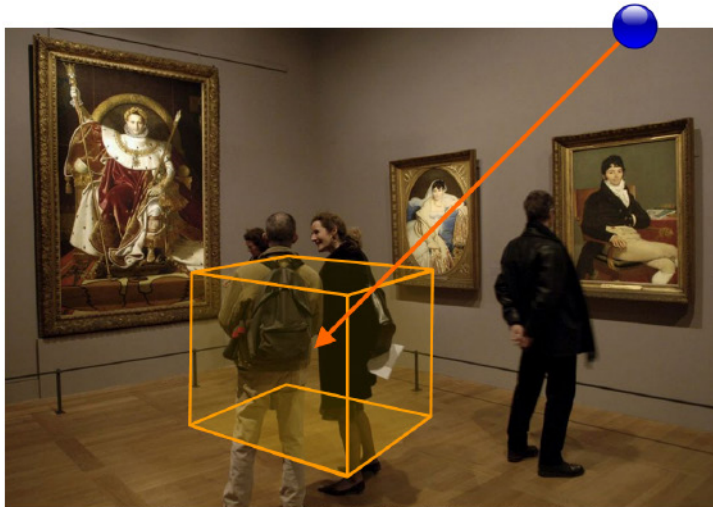
Caso 3D, ovvero **una singola ancora e nessuna necessità di misure di distanza.**



Radiolocalizzazione

Localizzazione a singola ancora

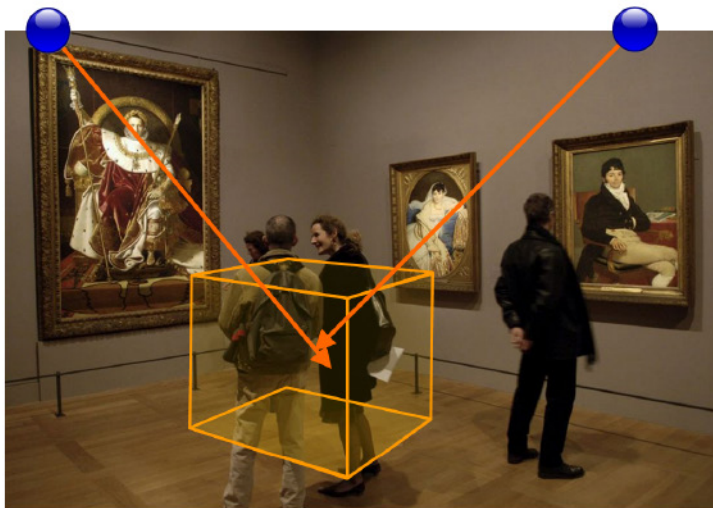
Caso 3D, ovvero **una singola ancora e nessuna necessità di misure di distanza.**



Radiolocalizzazione

Localizzazione a singola ancora

Caso 3D, ovvero **una singola ancora e nessuna necessità di misure di distanza**. A prescindere, più antenne possono collaborare nel processo di stima.

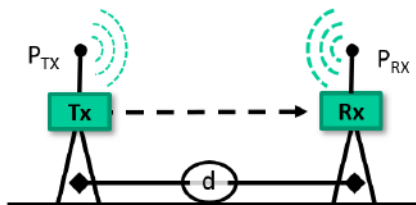


Radiolocalizzazione

Stime di distanza con RSSI

L'idea è localizzare tramite il **Received Signal Strength Indicator (RSSI)**.

Tipicamente usato per stime di distanza, fornisce risultati grezzi.

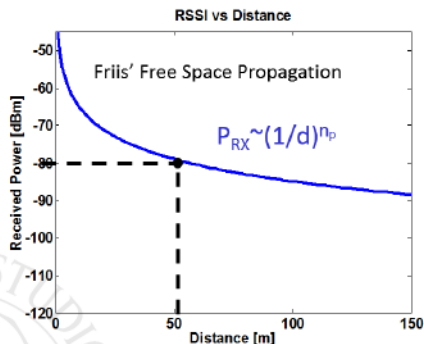
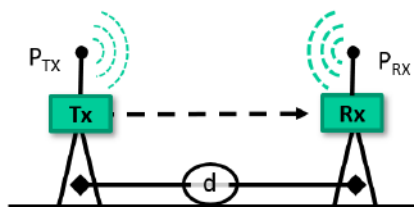


Radiolocalizzazione

Stime di distanza con RSSI

L'idea è localizzare tramite il **Received Signal Strength Indicator (RSSI)**.

Tipicamente usato per stime di distanza, fornisce risultati grezzi.

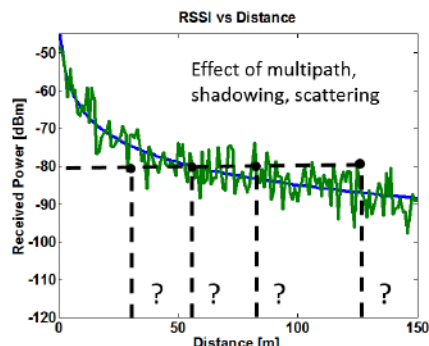
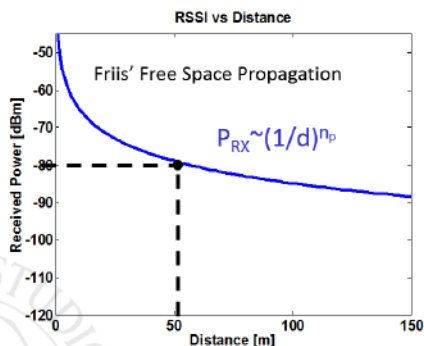
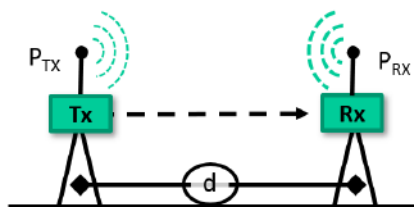


Radiolocalizzazione

Stime di distanza con RSSI

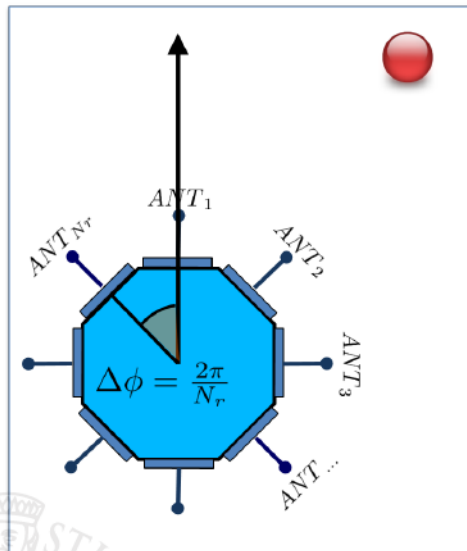
L'idea è localizzare tramite il **Received Signal Strength Indicator (RSSI)**.

Tipicamente usato per stime di distanza, fornisce **risultati grezzi**.



Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI



- $RSSI_1 = G_1(\theta) + P_{RX} + w_1$
- $RSSI_2 = G_2(\theta) + P_{RX} + w_2$
- $RSSI_3 = G_3(\theta) + P_{RX} + w_3$
- \vdots
- $RSSI_N = G_N(\theta) + P_{RX} + w_N$

In modo sintetico, il **modello di osservazione** del fenomeno è quindi:

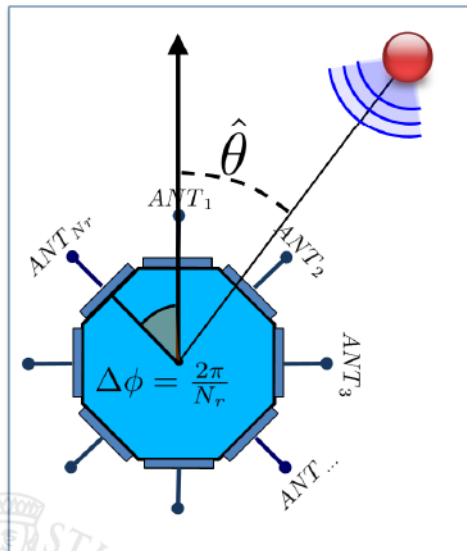
$$RSSI = G(\theta) + P_{RX} + w$$

dove la potenza ricevuta, che dipende dalla distanza, è **uniforme su tutti gli elementi** ed è pari a:

$$P_{RX} = P_{TX} + LOSS_{path}$$

Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI



- $RSSI_1 = G_1(\theta) + P_{RX} + w_1$
- $RSSI_2 = G_2(\theta) + P_{RX} + w_2$
- $RSSI_3 = G_3(\theta) + P_{RX} + w_3$
- \vdots
- $RSSI_N = G_N(\theta) + P_{RX} + w_N$

In modo sintetico, il **modello di osservazione** del fenomeno è quindi:

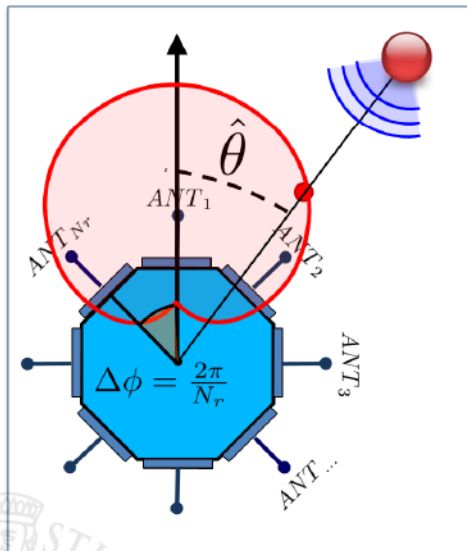
$$RSSI = G(\theta) + P_{RX} + w$$

dove la potenza ricevuta, che dipende dalla distanza, è **uniforme su tutti gli elementi** ed è pari a:

$$P_{RX} = P_{TX} + LOSS_{path}$$

Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI



- $RSSI_1 = G_1(\theta) + P_{RX} + w_1$
- $RSSI_2 = G_2(\theta) + P_{RX} + w_2$
- $RSSI_3 = G_3(\theta) + P_{RX} + w_3$
- \vdots
- $RSSI_N = G_N(\theta) + P_{RX} + w_N$

In modo sintetico, il **modello di osservazione** del fenomeno è quindi:

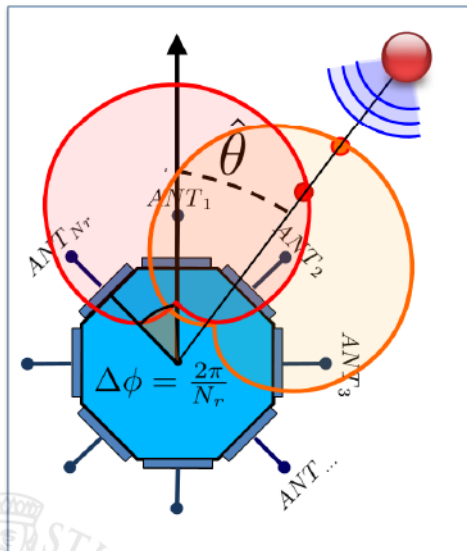
$$RSSI = G(\theta) + P_{RX} + w$$

dove la potenza ricevuta, che dipende dalla distanza, è **uniforme su tutti gli elementi** ed è pari a:

$$P_{RX} = P_{TX} + LOSS_{path}$$

Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI



- $RSSI_1 = G_1(\theta) + P_{RX} + w_1$
- $RSSI_2 = G_2(\theta) + P_{RX} + w_2$
- $RSSI_3 = G_3(\theta) + P_{RX} + w_3$
- \vdots
- $RSSI_N = G_N(\theta) + P_{RX} + w_N$

In modo sintetico, il **modello di osservazione** del fenomeno è quindi:

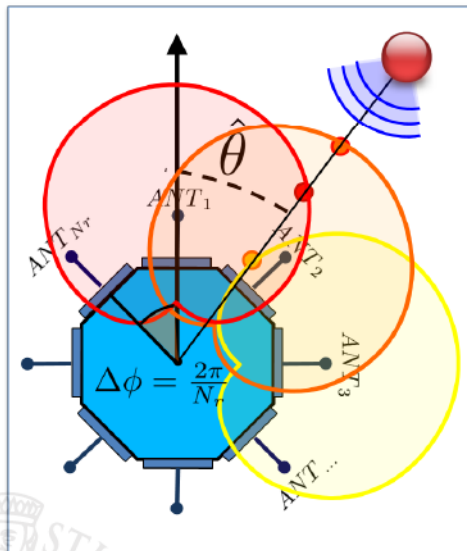
$$RSSI = G(\theta) + P_{RX} + w$$

dove la potenza ricevuta, che dipende dalla distanza, è **uniforme su tutti gli elementi** ed è pari a:

$$P_{RX} = P_{TX} + LOSS_{path}$$

Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI



- $RSSI_1 = G_1(\theta) + P_{RX} + w_1$
- $RSSI_2 = G_2(\theta) + P_{RX} + w_2$
- $RSSI_3 = G_3(\theta) + P_{RX} + w_3$
- \vdots
- $RSSI_N = G_N(\theta) + P_{RX} + w_N$

In modo sintetico, il **modello di osservazione** del fenomeno è quindi:

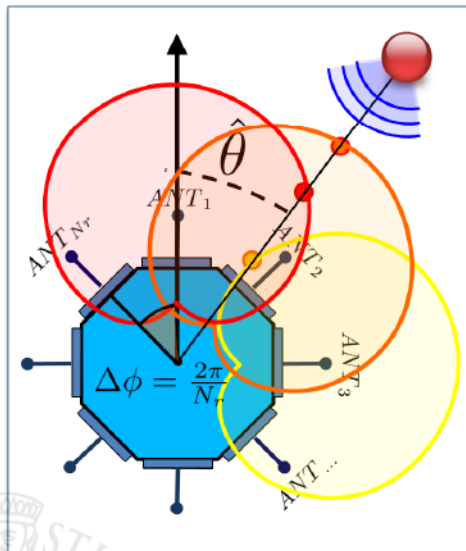
$$RSSI = G(\theta) + P_{RX} + w$$

dove la potenza ricevuta, che dipende dalla distanza, è **uniforme su tutti gli elementi** ed è pari a:

$$P_{RX} = P_{TX} + LOSS_{path}$$

Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI



- $RSSI_1 = G_1(\theta) + P_{RX} + w_1$
- $RSSI_2 = G_2(\theta) + P_{RX} + w_2$
- $RSSI_3 = G_3(\theta) + P_{RX} + w_3$
- \vdots
- $RSSI_N = G_N(\theta) + P_{RX} + w_N$

In modo sintetico, il **modello di osservazione** del fenomeno è quindi:

$$RSSI = G(\theta) + P_{RX} + w$$

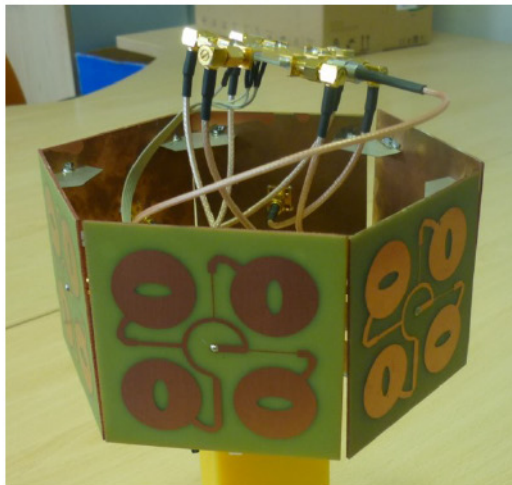
dove la potenza ricevuta, che dipende dalla distanza, è **uniforme su tutti gli elementi** ed è pari a:

$$P_{RX} = P_{TX} + LOSS_{path}$$

Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI

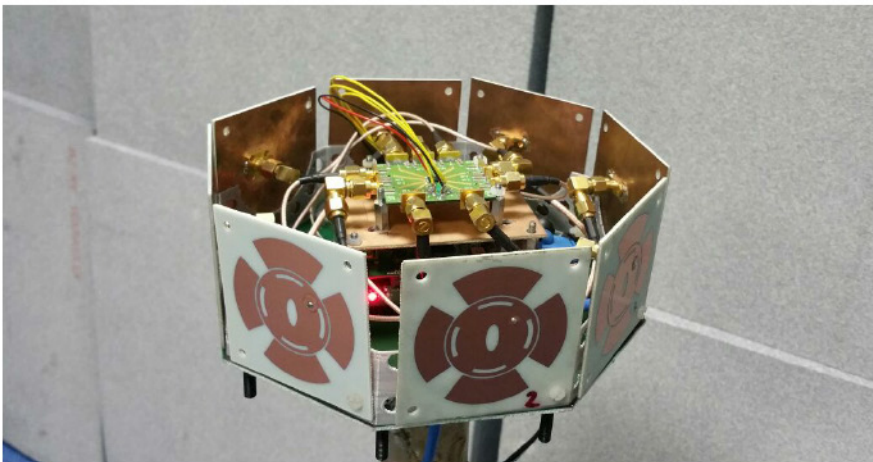
Nel caso di una struttura a simmetria cilindrica, come un **Uniform Circular Array (UCA)**, questo approccio permette di identificare la direzione di arrivo, **Direction of Arrival (DoA)**.



Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI

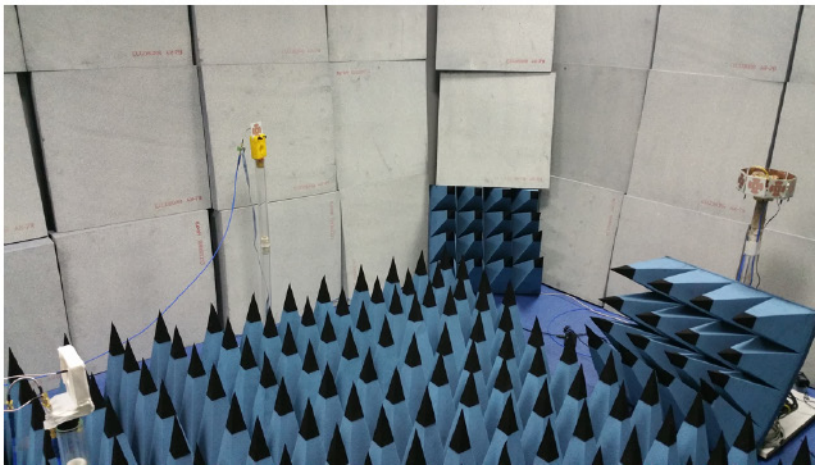
Nel caso di una struttura a simmetria cilindrica, come un **Uniform Circular Array (UCA)**, questo approccio permette di identificare la direzione di arrivo, **Direction of Arrival (DoA)**.



Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI

Nel caso di una struttura a simmetria cilindrica, come un **Uniform Circular Array (UCA)**, questo approccio permette di identificare la direzione di arrivo, **Direction of Arrival (DoA)**.



Radiolocalizzazione

Stime angolari con RSSI

Esistono moltissimi algoritmi per risolvere il problema, ripartendo dal **modello di osservazione**:

$$RSSI = G(\theta) + P_{RX} + w$$

L'approccio più semplice per la determinazione della DoA si riduce alla soluzione del seguente stimatore **Least Square**. Definita una funzione di costo / residuo:

$$C(\theta) = ||RSSI - G(\theta)|| = \sqrt{\sum_{n=1}^N |G_n(\theta) - RSSI_n|^2}$$

La DoA è identificata come quell'angolo che lo minimizza:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} C(\theta)$$

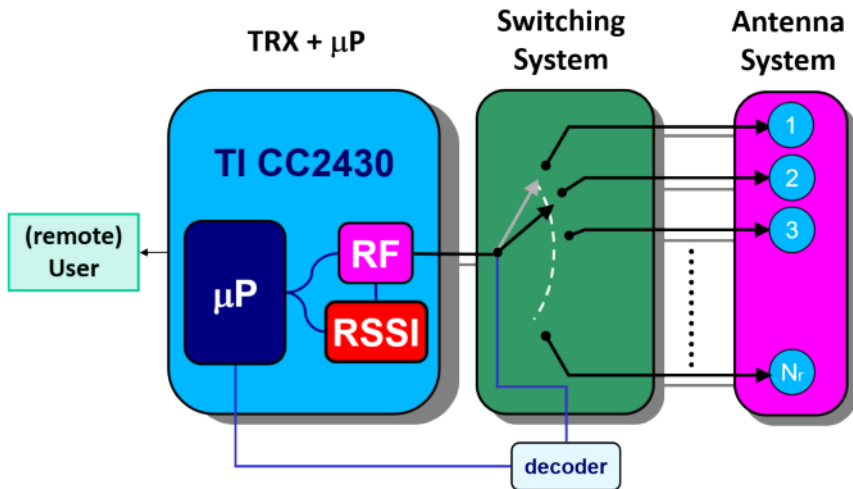
negli anni, sono state sviluppate anche varianti ad-hoc

Passafiume, M., Maddio, S., and Cidronali, A., *An improved approach for RSSI-based only calibration-free real-time indoor localization on IEEE 802.11 and 802.15.4 wireless networks*, MDPI SENSORS vol. 17, no. 4, pp.717, 2017

Radiolocalizzazione

Architettura

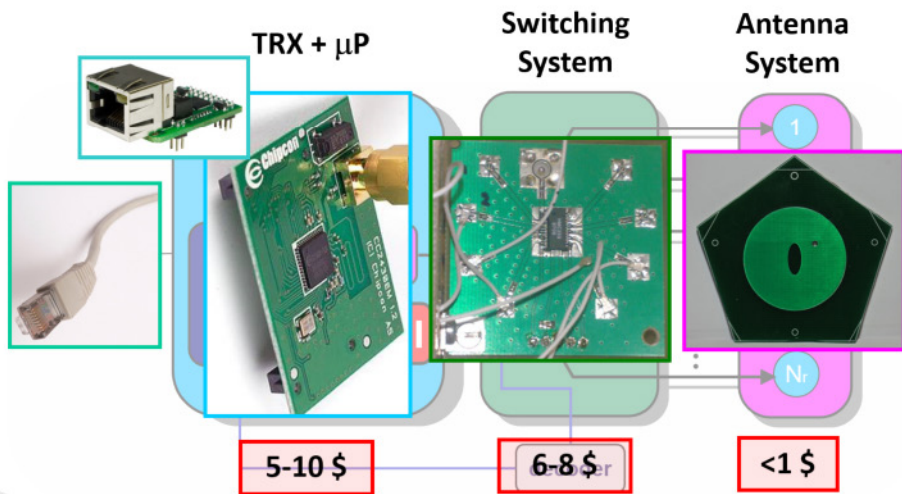
È stata studiata un'architettura low-cost, basata su **Components Off The Shelves**, e quindi non su misure di fase (approccio canonico).



Radiolocalizzazione

Architettura

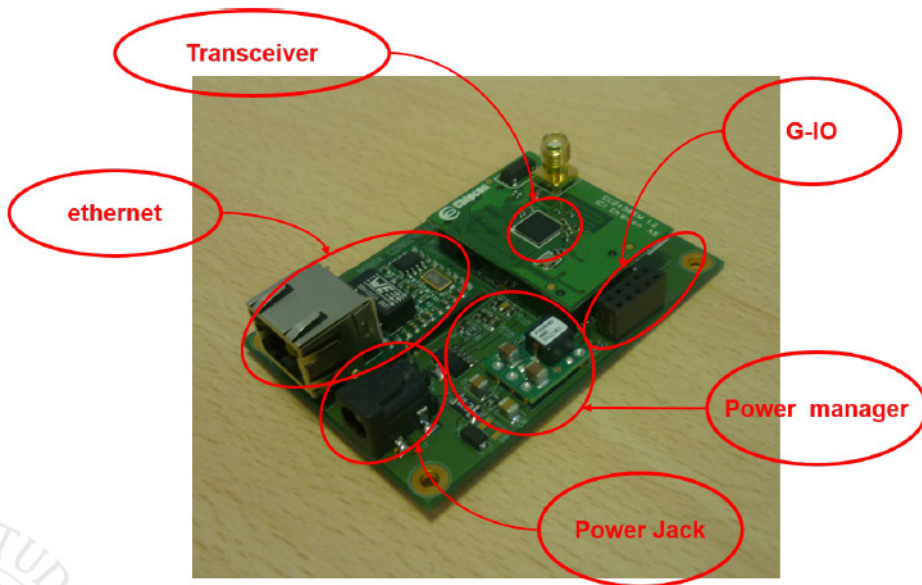
È stata studiata un'architettura low-cost, basata su **Components Off The Shelves**, e quindi non su misure di fase (approccio canonico).



Radiolocalizzazione

Architettura

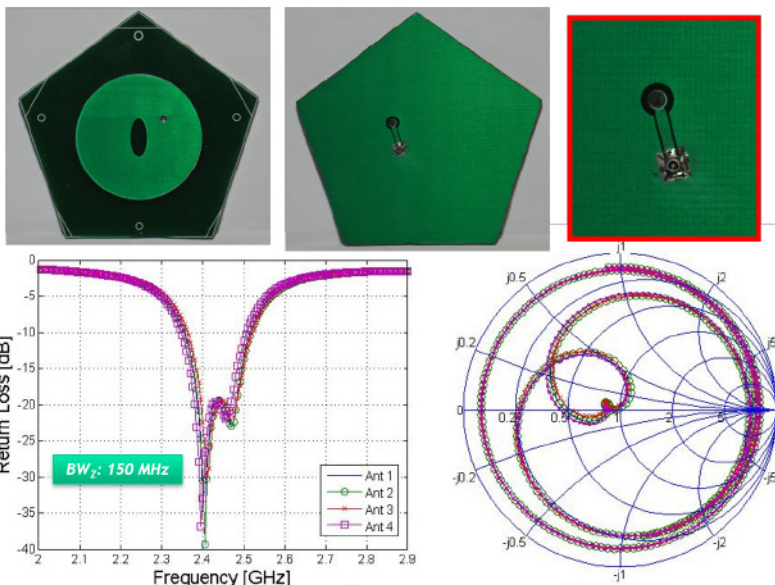
È stata studiata un'architettura low-cost, basata su **Components Off The Shelves**, e quindi non su misure di fase (approccio canonico).



Radiolocalizzazione

Architettura

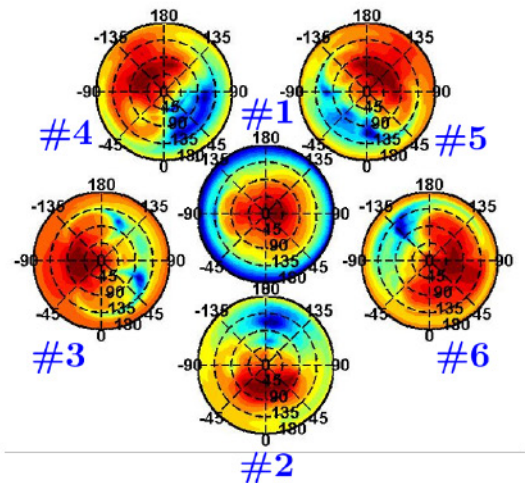
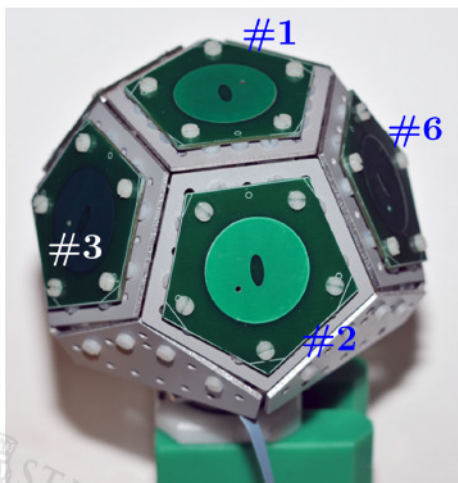
Il nodo è stato quindi re-ingegnerizzato. Una nuova generazione di antenne, **industrializzate con i micro-coassiali**, è stata messa a punto.



Radiolocalizzazione

Architettura

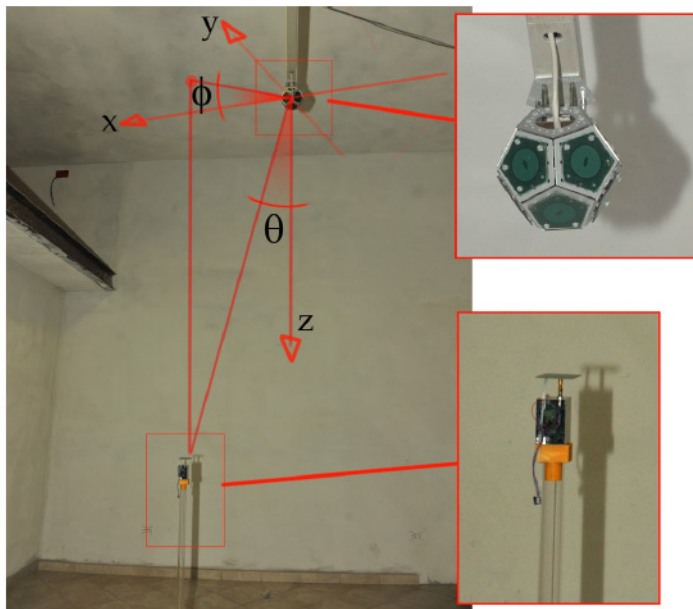
E di conseguenza una versione migliorata del nodo sensore, provvisto di **guscio di alluminio**, è stato sviluppato e assemblato, con l'hardware presentato.



Radiolocalizzazione

Architettura

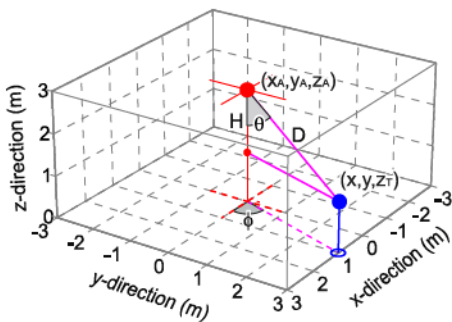
Sufficientemente robusto, il nodo è stato testato appeso a testa in giù



Radiolocalizzazione

Space Division Multiple Access

Grazie alla trigonometria, e all'ipotesi di dominanza del **contributo Line-Of-Sight**, si può facilmente trasformare il dominio angolare dei guadagni in un dominio cartesiano.



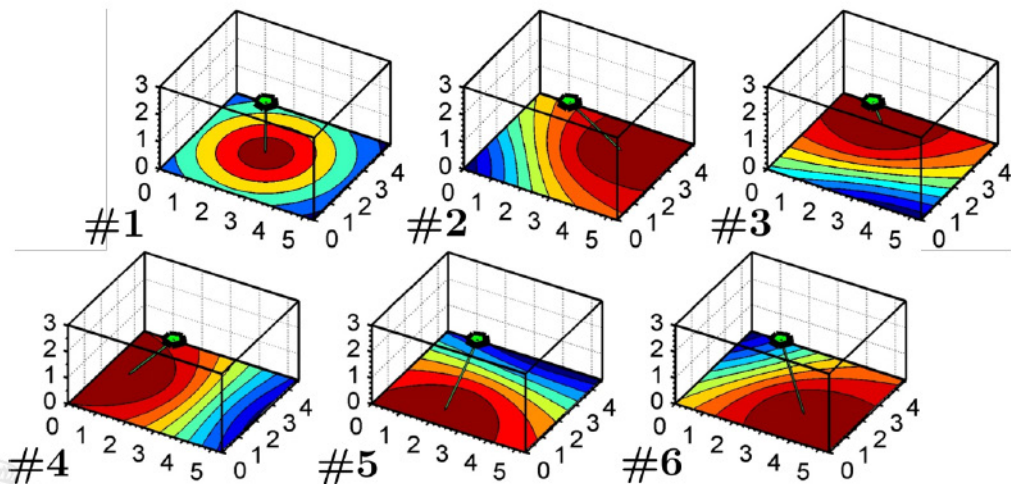
$$\begin{cases} D = \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + H^2} \\ \cos \theta = \frac{H}{D} = \frac{H}{\sqrt{H^2 + (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}} \\ \cos \phi = \frac{x - x_A}{\sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}} \\ \sin \phi = \frac{y - y_A}{\sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}} \end{cases}$$

$$\text{con } H = (z_A - z_T)$$

Radiolocalizzazione

Space Division Multiple Access

Con la capacità di isolare la ricezione da specifiche regioni angolari, lo **spazio monitorato** dal nodo viene segmentato, caratterizzato da una **radiomap** N-dimensionale.

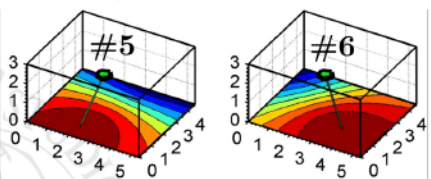
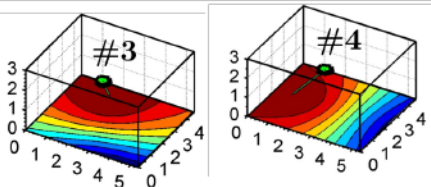
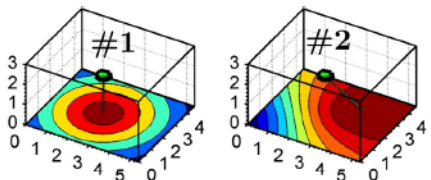


A differenza del **fingerprinting**, la mappatura in questo caso è **predittiva**.

Radiolocalizzazione

Space Division Multiple Access

Il modello di osservazione può essere visto come l'estensione al piano del modello angolare della DoA:



- $RSSI_1 = M_1(x, y) + P_{RX} + w_1$
- $RSSI_2 = M_2(x, y) + P_{RX} + w_2$
- \vdots
- $RSSI_N = M_N(x, y) + P_{RX} + w_N$

condensando, si ha:

$$RSSI = M(x, y) + P_{RX} + w$$

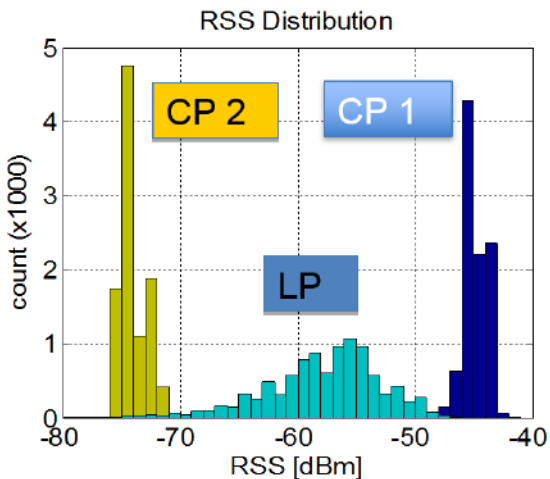
dove $M_i(x, y)$ sono le varie mappe di proiezione dei guadagni e la potenza ricevuta è costante su tutti gli elementi

$$P_{RX} = P_{TX} + LOSS_{proj}$$

Radiolocalizzazione

Space Division Multiple Access

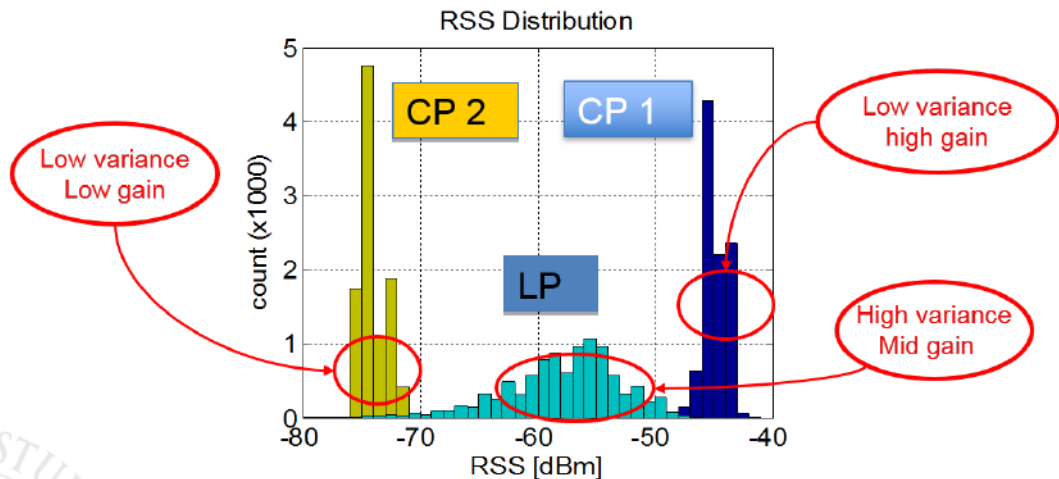
Si comprende l'importanza di operare in polarizzazione circolare: questa è **un potente ausilio per mitigare il multipath in modo nativo**, ancor prima di far intervenire meccanismi di protezione protocollare.



Radiolocalizzazione

Space Division Multiple Access

Si comprende l'importanza di operare in polarizzazione circolare: questa è **un potente ausilio per mitigare il multipath in modo nativo**, ancor prima di far intervenire meccanismi di protezione protocollare.



Radiolocalizzazione

Pseudo-spettro di localizzazione

Il problema della localizzazione si traduce di nuovo nella soluzione di un sistema non lineare in una variabile bidimensionale:

$$(\hat{x}, \hat{y}) : \mathbf{RSSI} = \mathbf{M}(x, y) + \mathbf{P}_{RX} + \mathbf{w}$$

Tra i vari metodi disponibili in letteratura, adattabili al modello di osservazione proposto, si hanno:

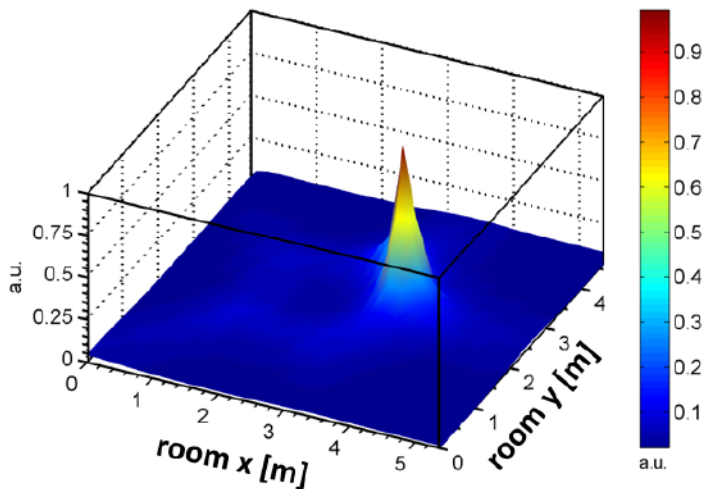
- 1 **Strongest** – il valore di RSSI identifica il dominio dell'antenna n ;
- 2 **FingerPrinting** – il valore di RSSI viene cercato nella radiomap;
- 3 **Maximum Likelihood** – la posizione è determinata dalla verosimiglianza secondo una funzione di costo;
- 4 **Subspace Method** – si sfruttano le proprietà dell'algebra lineare.



Radiolocalizzazione

Pseudo-spettro di localizzazione

Quasi tutti i metodi si traducono in uno **pseudo-spettro**, una funzione dello spazio che presenta un massimo in corrispondenza della posizione cercata



Radiolocalizzazione

Pseudo-spettro di localizzazione



STRONGEST $PS_S(x, y) = \{x, y | \max_{RSSI}\}$

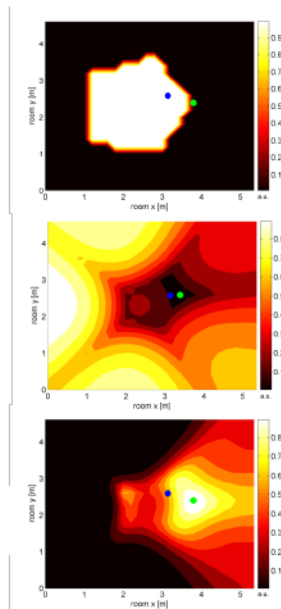
The spectrum is the domain where the Gain corresponding to the maximum position in RSSI is maximum (zoning)

MIN ERROR $PS_E(x, y) = \|S - G(x, y)\|$

Given the RSSI vector, the spectrum is the zone where S has minimum distance to G in a LMS sense (minimum difference)

CAPON MVD $PS_C(x, y) = \frac{1}{G(x, y)' R_{xx}^{-1} G(x, y)}$

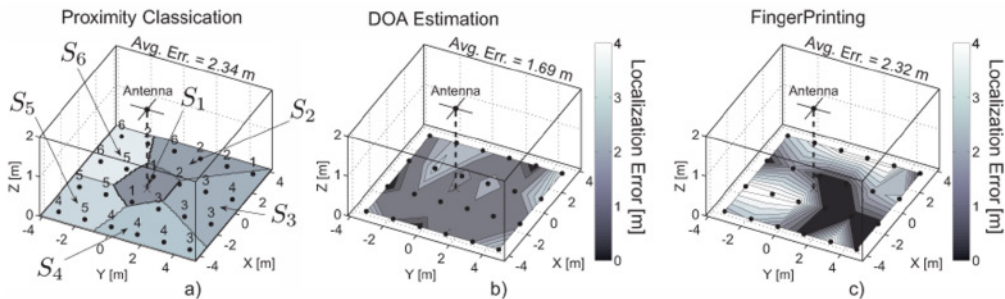
Minimum Variance Distortionless Method. The solution is found maximising the SIR of desire signal



Radiolocalizzazione

Pseudo-spettro di localizzazione

Alcuni risultati, ottenuti con il primo prototipo



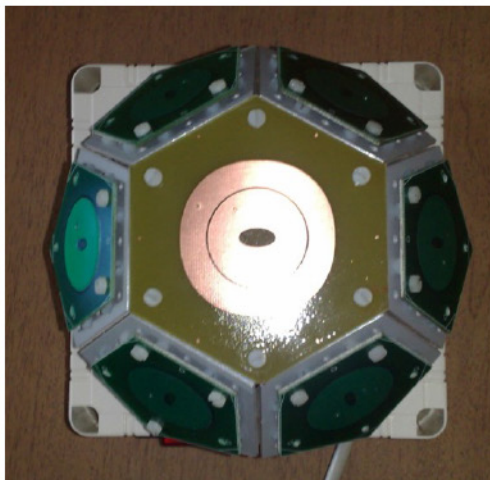
Errore medio

- MUSIC = 1.69 m;
- FingerPrinting = 2.32 m;
- Strongest RSSI = 2.34 m;

Radiolocalizzazione

Ulteriori sviluppi

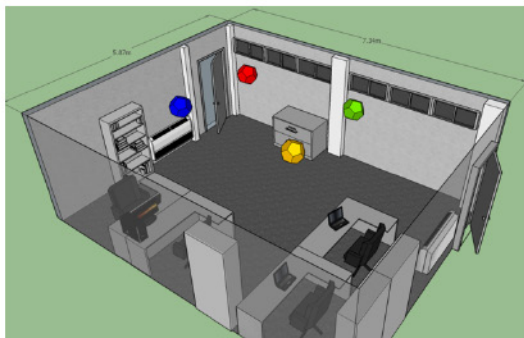
Abbandonata la forma esattamente semisferica, il nodo si è ulteriormente evoluto, per meglio monitorare un'area reale con un maggior numero di beam.



Radiolocalizzazione

Ulteriori sviluppi

In costellazione con altri nodi, la sistema è in grado di determinare la posizione del target mobile **in maniera collaborativa**, con una radiomap $N \times M$ - dimensionale.



L'approccio collaborativo è intrinsecamente **ricongfigurabile e scalabile**.

Radiolocalizzazione

Ulteriori sviluppi

In costellazione con altri nodi, la sistema è in grado di determinare la posizione del target mobile **in maniera collaborativa**, con una radiomap $N \times M$ - dimensionale.

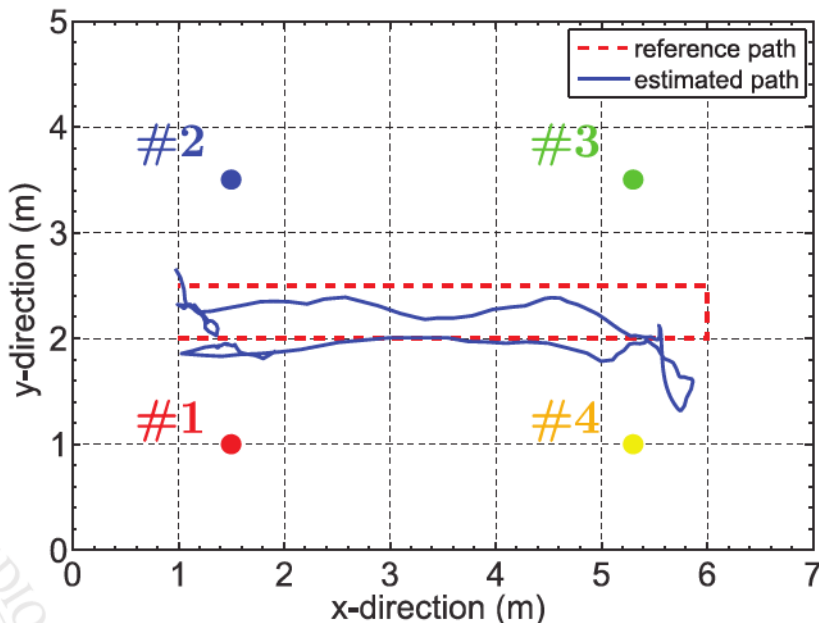


L'approccio collaborativo è intrinsecamente **ricongfigurabile e scalabile**.

Radiolocalizzazione

Ulteriori sviluppi

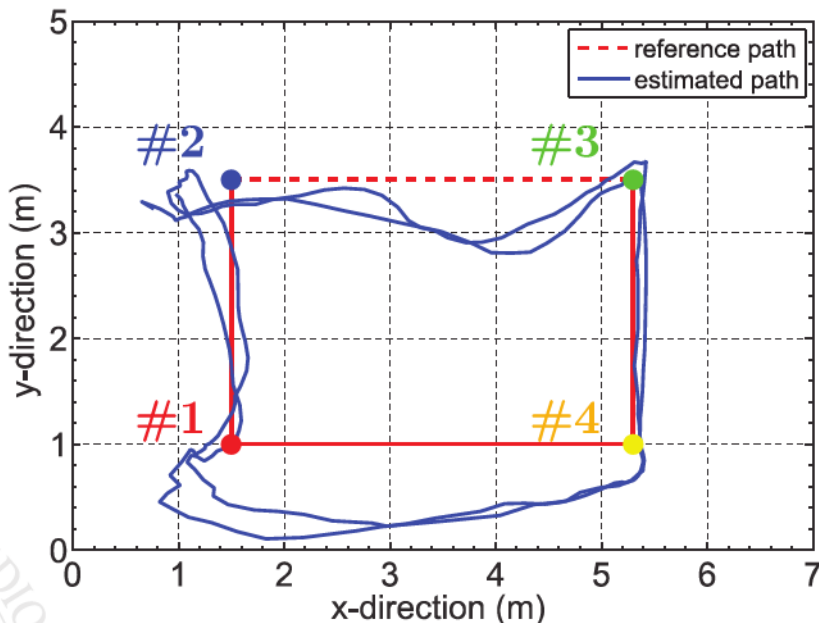
Grazie a questo approccio, è stato possibile operare anche un **tracking in tempo reale**:



Radiolocalizzazione

Ulteriori sviluppi

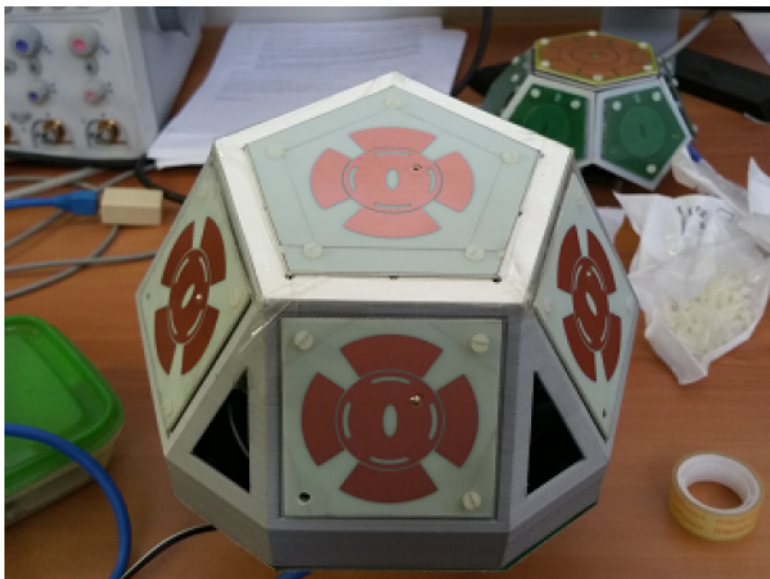
Grazie a questo approccio, è stato possibile operare anche un **tracking in tempo reale**:



Radiolocalizzazione

Ulteriore "ulteriore" sviluppo...

L'ultima evoluzione, è un nodo stampato con una stampante 3D, capace di operatività multibanda, costituendo quindi un'oggetto SFDMA.



Applicazione alla fruizione dei beni museali

Recentemente il mio gruppo di ricerca ha partecipato, vincendolo, a un bando della **Cassa di Risparmio** dal titolo **Smart Museum: Sistema di localizzazione Wireless per la fruizione interattiva dei beni museali e culturali**.



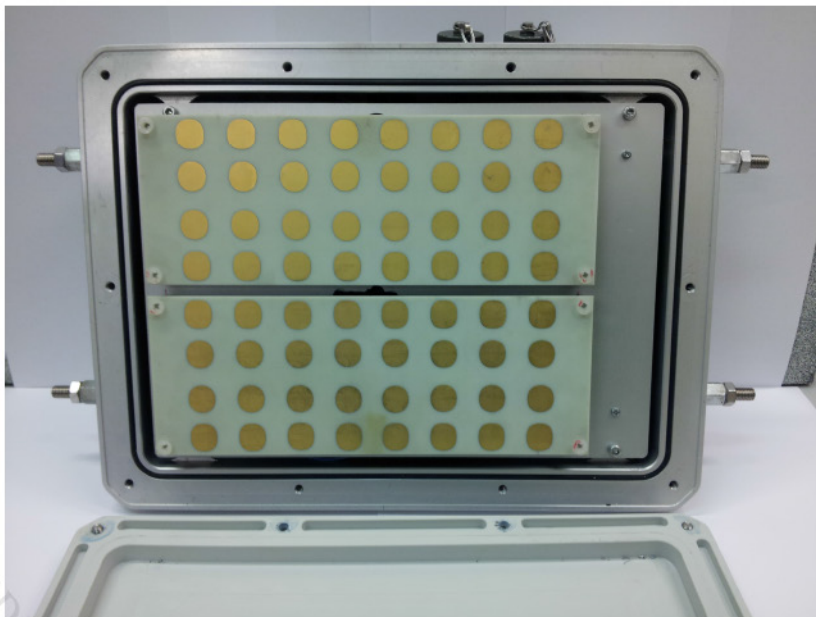
Radiolocalizzazione

Bibliografia

- Maddio, Cidronali, Manes, *Analysis and performance of a smart antenna for 2.45-GHz single-anchor indoor positioning*, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, vol. 58, pp.21–31, 2010;
- Maddio, Passafiume, Cidronali, Manes, *A Distributed Positioning System Based on a Predictive Fingerprinting Method Enabling Sub-Metric Precision in IEEE 802.11 Networks*, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, vol. 12, pp.4567–4580, 2015;
- Maddio, Cidronali, Passafiume, Collodi, Lucarelli, Maurri, *Multipath Robust Azimuthal Direction of Arrival Estimation in Dual-Band 2.45–5.2 GHz Networks*, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, vol. 65, pp.4438-4449, 2017;
- Cidronali, Collodi, Maddio, Passafiume, Pelosi, *2-D DoA Anchor Suitable for Indoor Positioning Systems Based on Space and Frequency Diversity for Legacy WLAN*, IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS Vol.28, pp.627 - 629, July 2018;

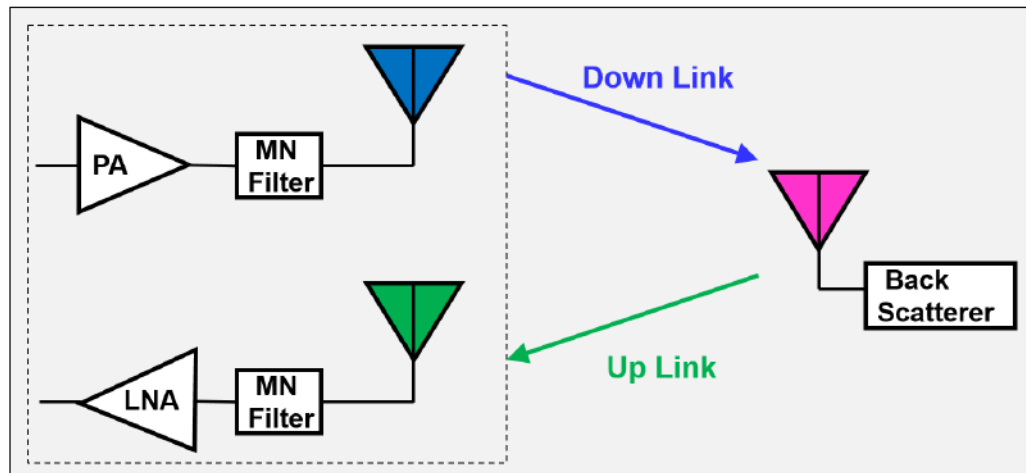
Cancellazione di autointerferenza

Uno dei problemi che un front-end reale si trova ad affrontare è quello del **mutual coupling**, e dei conseguenti effetti a livello di segnale.



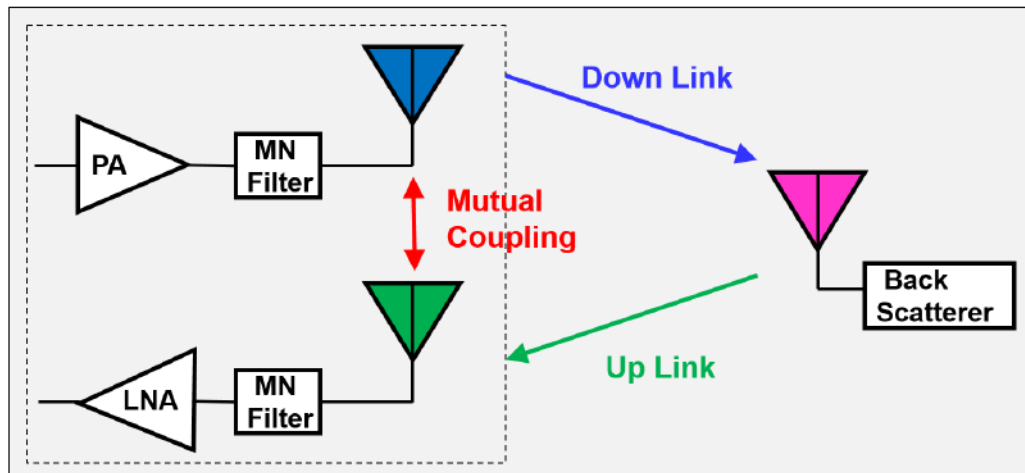
Cancellazione di autointerferenza

Uno dei problemi che un front-end reale si trova ad affrontare è quello del **mutual coupling**, e dei conseguenti effetti a livello di segnale.



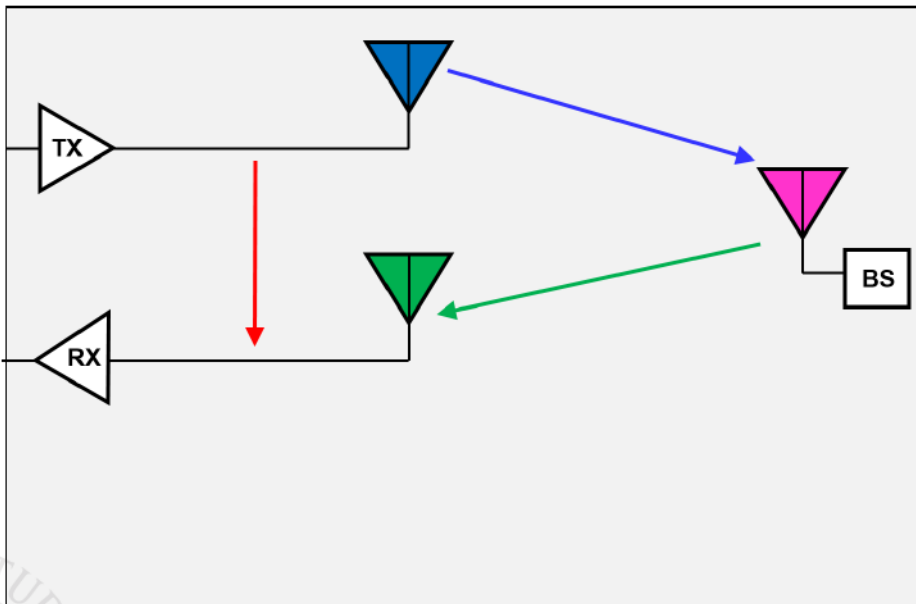
Cancellazione di autointerferenza

Uno dei problemi che un front-end reale si trova ad affrontare è quello del **mutual coupling**, e dei conseguenti effetti a livello di segnale.



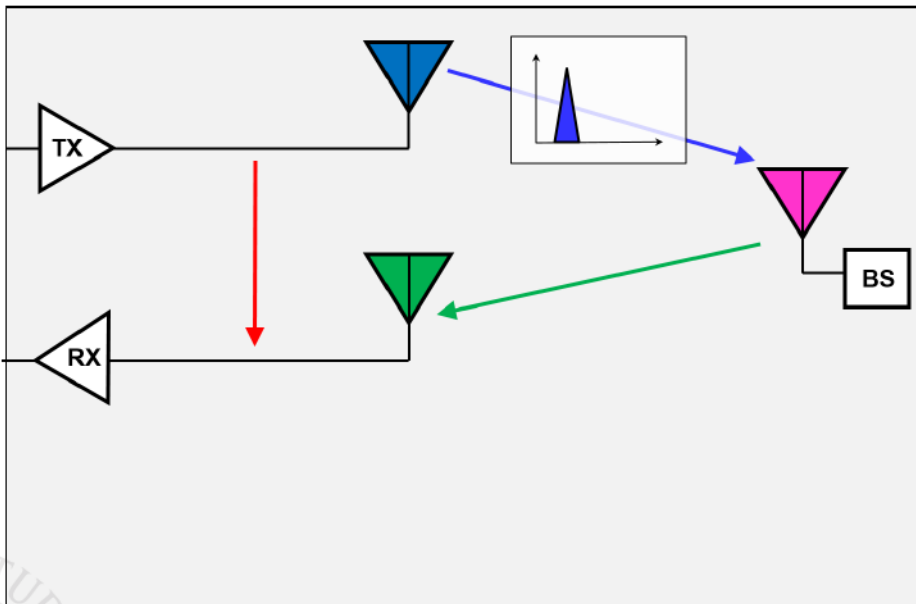
Cancellazione di autointerferenza

Dal punto di vista sistemistico, questo problema si traduce nella comparsa di un **segnale aggressore autoinfilitto** che disturba il segnale ricevuto.



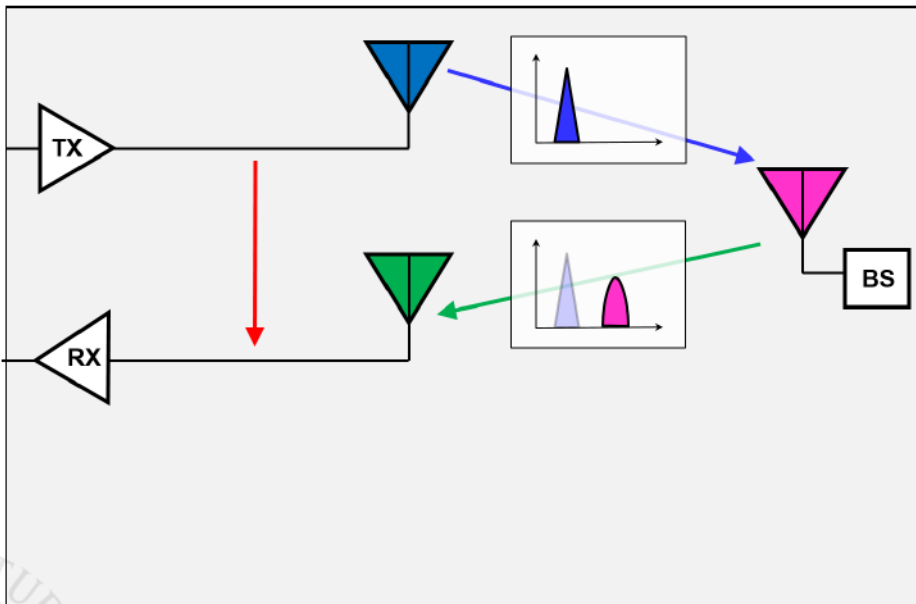
Cancellazione di autointerferenza

Dal punto di vista sistemistico, questo problema si traduce nella comparsa di un **segnale aggressore autoinfilitto** che disturba il segnale ricevuto.



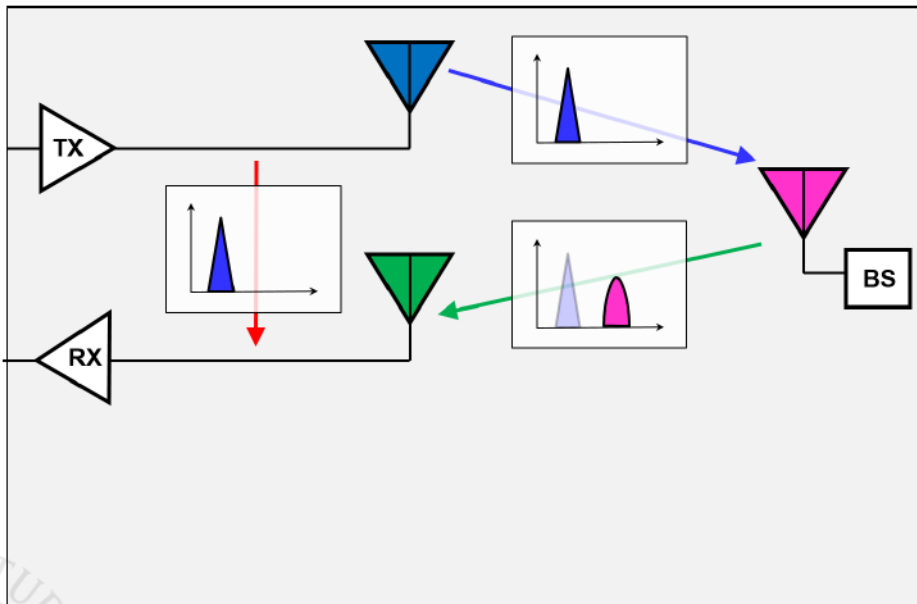
Cancellazione di autointerferenza

Dal punto di vista sistemistico, questo problema si traduce nella comparsa di un **segnale aggressore autoinfilto** che disturba il segnale ricevuto.



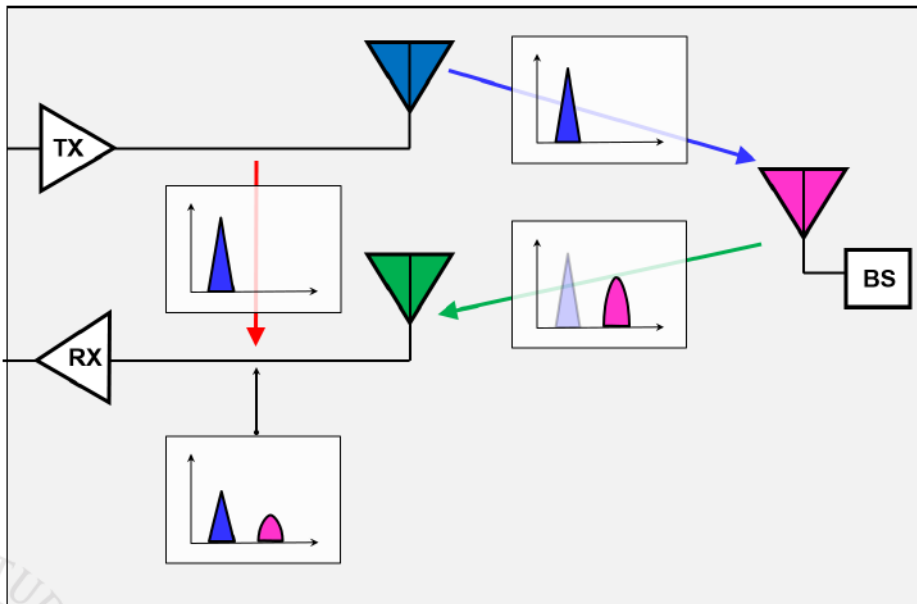
Cancellazione di autointerferenza

Dal punto di vista sistemistico, questo problema si traduce nella comparsa di un **segnale aggressore autoinfilitto** che disturba il segnale ricevuto.



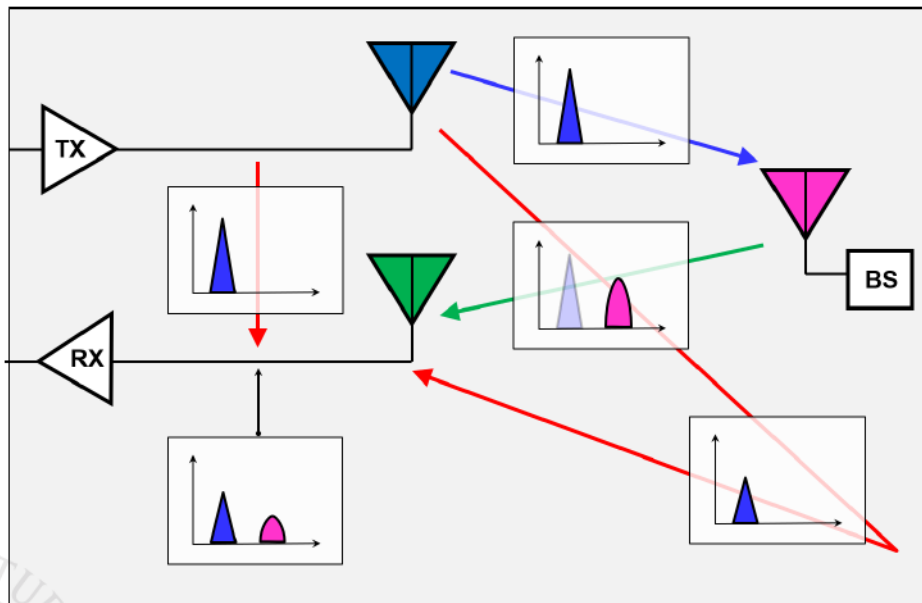
Cancellazione di autointerferenza

Dal punto di vista sistemistico, questo problema si traduce nella comparsa di un **segnale aggressore autoinfilto** che disturba il segnale ricevuto.



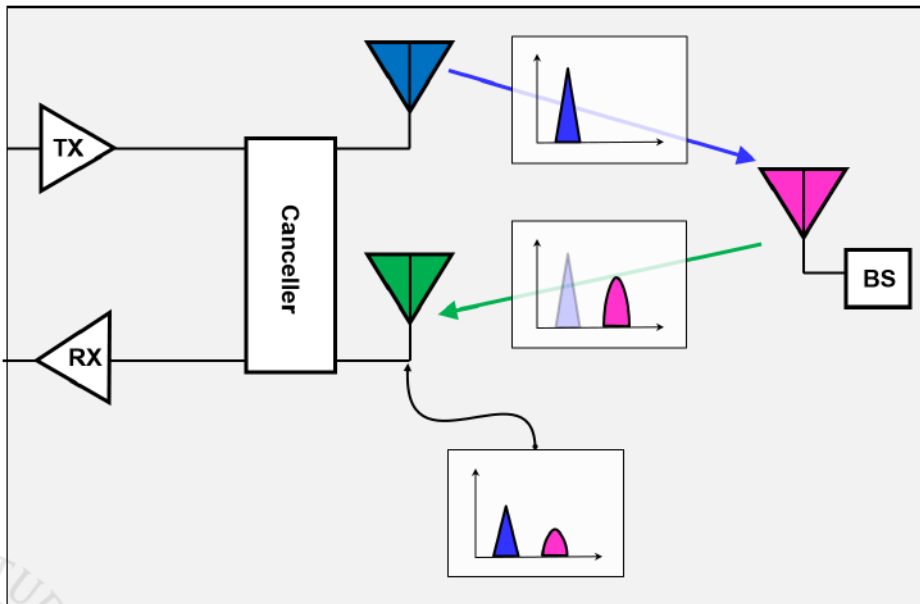
Cancellazione di autointerferenza

Dal punto di vista sistemistico, questo problema si traduce nella comparsa di un **segnale aggressore autoinfilto** che disturba il segnale ricevuto.



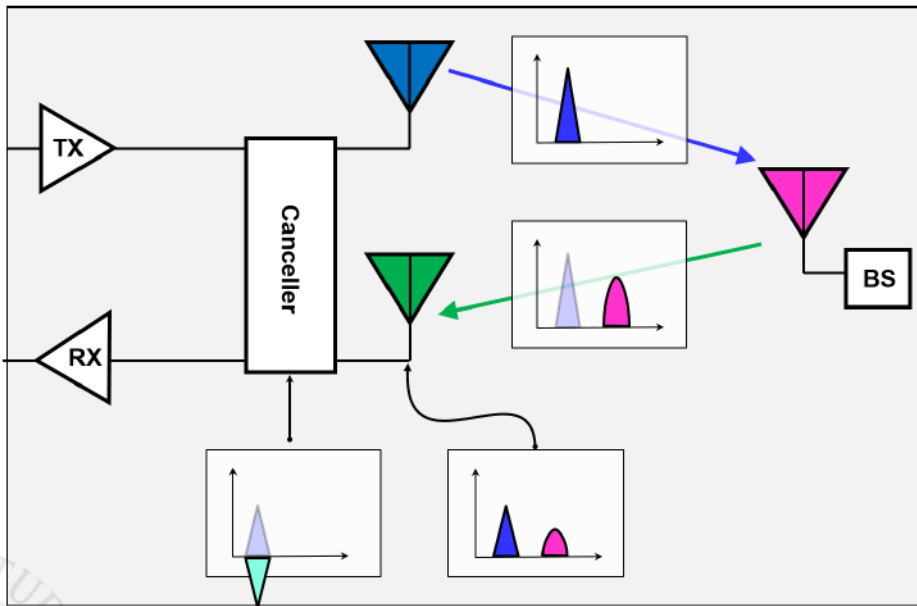
Cancellazione di autointerferenza

Il cancellatore di autointerferenza è il dispositivo che introduce una replica invertita del segnale aggressore in modo da annullarne gli effetti.



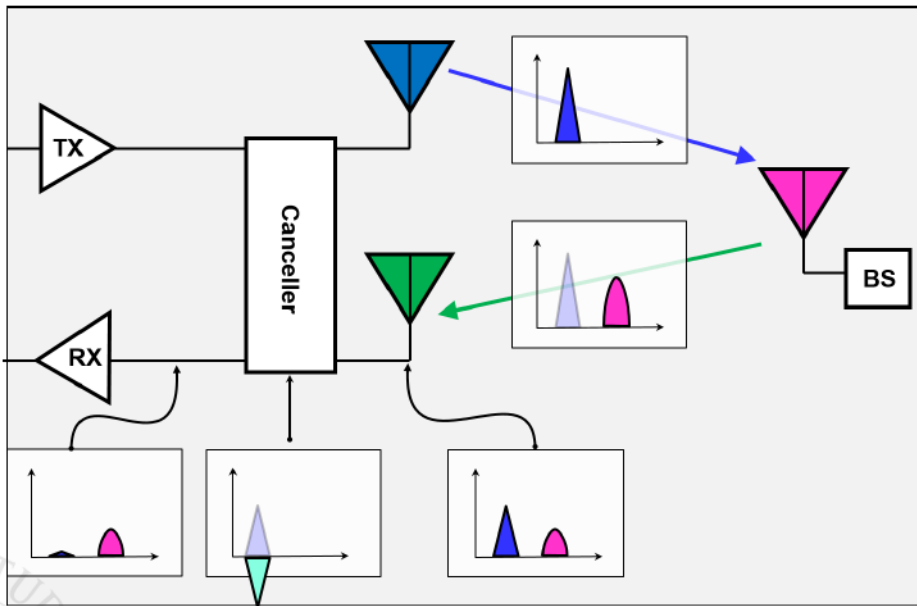
Cancellazione di autointerferenza

Il cancellatore di autointerferenza è il dispositivo che introduce una replica invertita del segnale aggressore in modo da annullarne gli effetti.



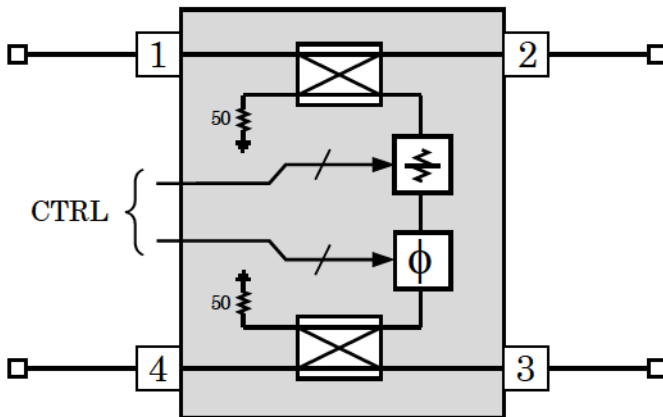
Cancellazione di autointerferenza

Il cancellatore di autointerferenza è il dispositivo che introduce una replica invertita del segnale aggressore in modo da annullarne gli effetti.



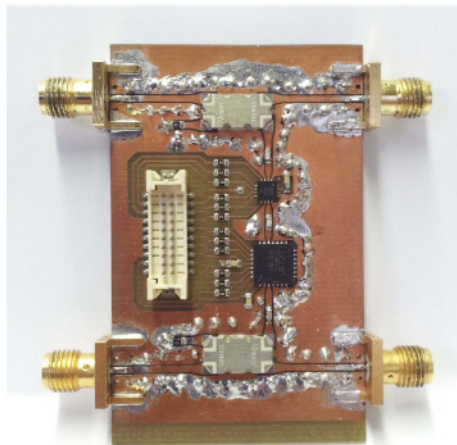
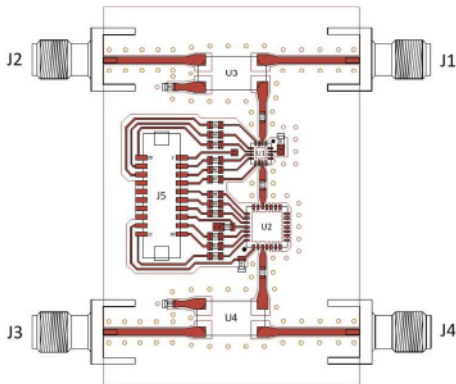
Cancellazione di autointerferenza

Concettualmente, un cancellatore è un dispositivo molto semplice: si compone di **due accoppiatori direzionali** e da una sezione di manipolazione costituita da un **attenuatore variabile** e uno **sfasatore variabile**.



Cancellazione di autointerferenza

Concettualmente, un cancellatore è un dispositivo molto semplice: si compone di **due accoppiatori direzionali** e da una sezione di manipolazione costituita da un **attenuatore variabile** e uno **sfasatore variabile**.



Cancellazione di autointerferenza

Supponiamo di lavorare a banda stretta. Il segnale trasmesso è quindi esprimibile come:

$$T(t) = |T| \cos(\omega_c t)$$

la funzione di trasferimento del leakage, si può parimenti supporre a banda stretta, $h_l(t) = h_l \delta(t - \tau_l)$. Il segnale di autointerferenza assume quindi la forma:

$$L(t) = T(t) * h_l(t) = |L| \cos(\omega_c t + \phi_L)$$

E l'isolamento tra i due percorsi **TX** e **RX** può essere quantificato semplicemente come:

$$I = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (L(t))^2 dt}{\frac{1}{T} \int_0^T (T(t))^2 dt} = \frac{|L|^2}{|T|^2}$$



Cancellazione di autointerferenza

La risposta impulsiva del cancellatore può essere parimenti identificata con:

$h_c(t) = h_c \delta(t - \tau_c)$, il che rende il segnale di leakage pari a:

$$C(t) = T(t) * h_c(t) = |C| \cos(\omega_c t + \phi_C)$$

L'isolamento dopo l'applicazione del cancellatore risulta:

$$\hat{I} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (L(t) + C(t))^2 dt}{\frac{1}{T} \int_0^T (T(t))^2 dt}$$

che può essere riformulata nel seguente:

$$\hat{I} = \frac{|L|^2 + |C|^2 + 2|L||C| \cos(\phi_C - \phi_L)}{|T|^2}$$



Cancellazione di autointerferenza

pertanto, introducendo la **figura di cancellazione CF** come il rapporto tra la condizione precedente e successiva, si ha:

$$CF = \frac{I}{\hat{I}} = \left(1 + \left| \frac{C}{L} \right|^2 + 2 \left| \frac{C}{L} \right| \cos(\phi_C - \phi_L) \right)^{-1}$$

esplicitando lo sbilanciamento tra $C(t)$ e $L(t)$ nel seguente, si ha:

$$A = \frac{|C|}{|L|} = \frac{h_c}{h_l} \quad (3a)$$

$$\delta = (\phi_C - \phi_L) = 2\pi(\tau_c - \tau_l) \quad (3b)$$

il che implica:

$$CF = \left(1 + A^2 + 2A \cos(\delta) \right)^{-1}$$

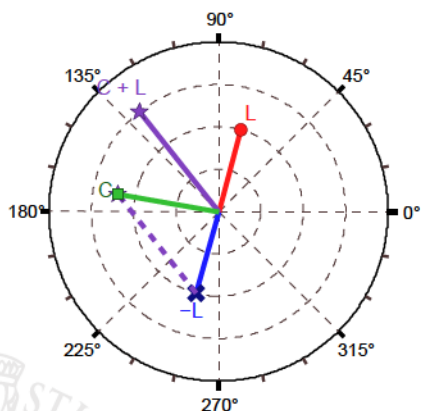
l'ovvia conclusione è che la cancellazione sarebbe perfetta se il segnale cancellante fosse l'opposto del segnale cancellando.

Cancellazione di autointerferenza

Il problema è che

- **L** non è misurabile isolatamente;
- **L** è tempo variante, anche abbastanza rapidamente, perché dipende anche dall'ambiente.

Dato un generico segnale **L**, ciò che si può **misurare** è la somma $\mathbf{E} = \mathbf{C} + \mathbf{L} = \mathbf{C} - (-\mathbf{L})$, che è sostanzialmente la stima dell'errore di $-\mathbf{L}$ da parte di \mathbf{C} .



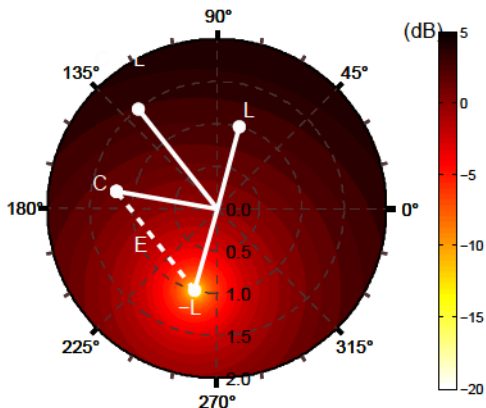
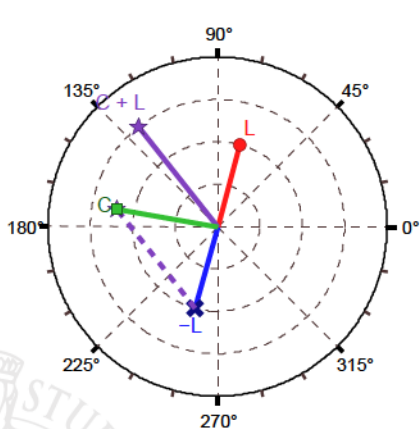
Il modulo dell'errore ha la forma: $E = E(A, \delta) = \sqrt{1 + A^2 + 2A \cos(\delta)}$

Cancellazione di autointerferenza

Il problema è che

- **L** non è misurabile isolatamente;
- **L** è tempo variante, anche abbastanza rapidamente, perché dipende anche dall'ambiente.

Dato un generico segnale **L**, ciò che si può **misurare** è la somma $\mathbf{E} = \mathbf{C} + \mathbf{L} = \mathbf{C} - (-\mathbf{L})$, che è sostanzialmente la stima dell'errore di $-\mathbf{L}$ da parte di **C**.

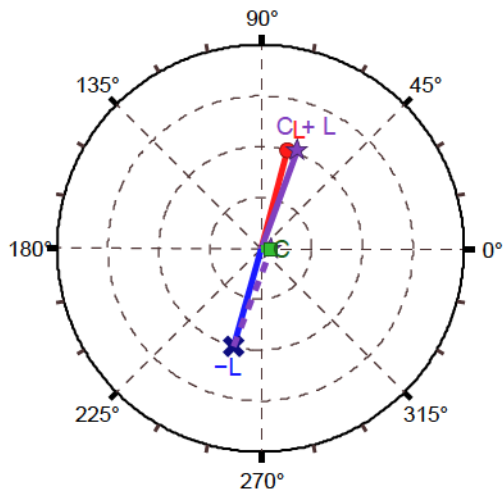


Il modulo dell'errore ha la forma: $E = E(A, \delta) = \sqrt{1 + A^2 + 2A \cos(\delta)}$

Cancellazione di autointerferenza

Algoritmo di Cancellazione

Step #1 inizialmente, si impone la massima attenuazione A_1 , iniettando il segnale C_1 , con una fase casuale. Dal momento che $|C_1| \ll |L|$, il segnale errore risultante, ovvero $E_1 = |L + C_1|$ è una stima $|L|$.



Cancellazione di autointerferenza

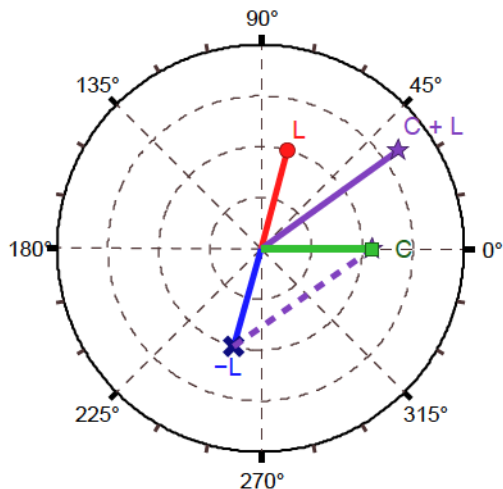
Algoritmo di Cancellazione

Step #2 L'attentatore viene impostato a A_2 in modo da avere un segnale cancellante \mathbf{C}_2 di modulo $C_2 = E_1 \approx |\mathbf{L}|$. La fase ϕ_2 , è puramente arbitraria, dal momento che non esistono informazioni a riguardo.

Ricordando Carnot, l'errore vale:

$$E_2 \cong \sqrt{2\sqrt{1 + \cos \delta_2}}$$

dove l'approssimazione è d'obbligo, ricordando che $|\mathbf{C}_2|$ non è esattamente $|\mathbf{L}|$.



Cancellazione di autointerferenza

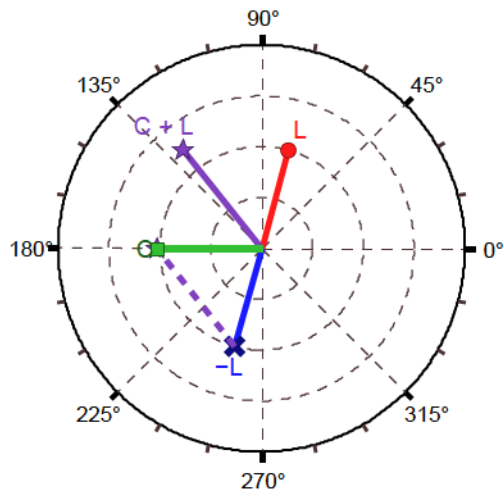
Algoritmo di Cancellazione

Step #3: il segnale C_3 supplementare di C_2 viene quindi iniettato, per cui la fase è $\delta_3 = \pi - \delta_2$, e di conseguenza

$$E_3 \cong \sqrt{2} \sqrt{1 + \cos \delta_3} = \sqrt{2} \sqrt{1 - \cos \delta_2}$$

Per trigonometria elementare, si ha:

$$\hat{\delta} = \pm 2 \operatorname{atan} \frac{E_3}{E_2}$$

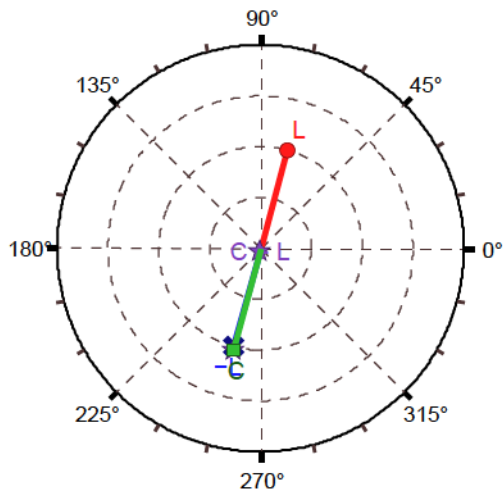


Cancellazione di autointerferenza

Algoritmo di Cancellazione

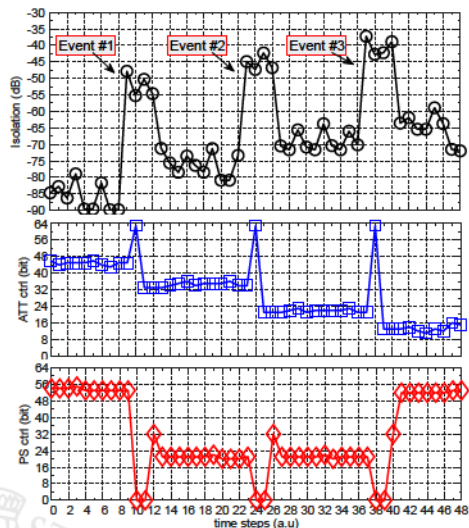
Step #4: A questo punto, una stima di anti-leakage $-\mathbf{L}$ è possibile, con un'ambiguità, risolvibile tentando i due segni:

$$-\hat{\mathbf{L}} = E_0 \exp(j(\pi + \phi_2 \pm \hat{\delta}))$$



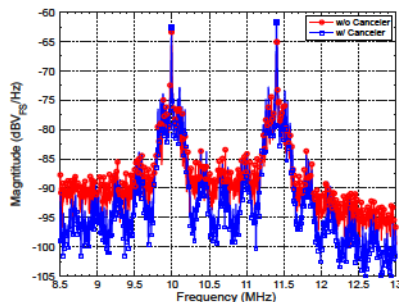
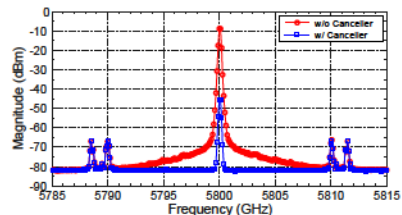
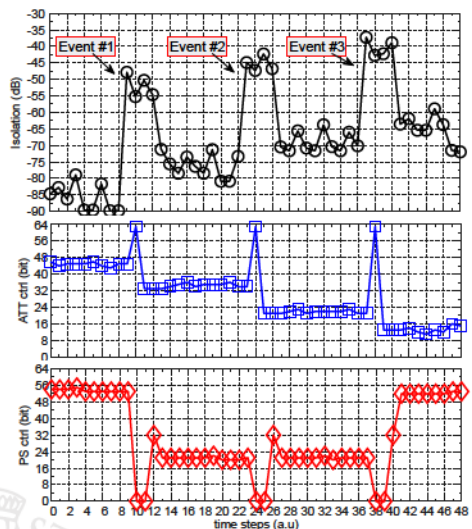
Cancellazione di autointerferenza

Grazie a questo algoritmo, è possibile seguire e neutralizzare il mutual coupling tempo variante con il cancellatore sviluppato.



Cancellazione di autointerferenza

Grazie a questo algoritmo, è possibile seguire e neutralizzare il mutual coupling tempo variante con il cancellatore sviluppato.



Cancellazione di autointerferenza

Bibliografia

- Maddio, S., Cidronali, A. and Manes, G., *Real-time adaptive transmitter leakage cancelling in 5.8-GHz full-duplex transceivers*. IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, vol. 63, no. 2, pp.509–519, 2015;
- Maddio S., Cidronali, A. and Collodi, G., *Base-band training of carrier leakage canceller in 5.8-GHz full-duplex transceivers*, MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS, vol.58, no. 11, pp.2649 – 2653;
- Cidronali, A., Maddio S., Passafiume M., and Manes G., *Car talk: technologies for vehicle-to-roadside communications*, IEEE MICROWAVE MAGAZINE vol. 17, no. 11, pp.40–60, 2016,
- Maddio, S., Cidronali, A., Passafiume, M., Collodi, G., and Manes, G. *Interference cancellation for the coexistence of 5.8 GHz DSRC and 5.9 GHz ETSI ITS*, IEEE MTT-S INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVES FOR INTELLIGENT MOBILITY (ICMIM), pp.1–4, 2015.

Ringraziamenti

Vorrei concludere ringraziando tutti i colleghi e gli amici che mi hanno sopportato e supportato in questi anni. Un grazie in particolare ai miei attuali compagni di stanza che mi sopportano tutti i giorni quando mi improvviso fotografo!



Ringraziamenti

Vorrei concludere ringraziando tutti i colleghi e gli amici che mi hanno sopportato e supportato in questi anni. Un grazie in particolare ai miei attuali compagni di stanza che mi sopportano tutti i giorni quando mi improvviso fotografo!





Thank you for your attention

