



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Dipartimento di Ingegneria ed Architettura

XXV CICLO DEL DOTTORATO DI RICERCA  
IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Anno Accademico 2011/2012

IEEE 802.11 Networks: MAC Protocols  
for Heterogeneous Multi-Antenna Scenarios and  
Software-Defined Radio PHY Layer Implementation

**Aljoša Dorni**

Supervisore:  
**Prof. Fulvio Babich**

Trieste, 13 marzo 2013

- ▶ Multi-Packet Communication (MPC)
  - ▶ Scenario
  - ▶ Soluzioni sviluppate
  - ▶ Implementazione
  - ▶ Risultati
- ▶ Rice-trasmittitore IEEE 802.11 in Software-Defined Radio (SDR)<sup>1</sup>
  - ▶ Concetto SDR
  - ▶ Implementazione
  - ▶ Risultati
- ▶ Conclusioni e sviluppi futuri

---

<sup>1</sup>Attività svolta presso il Forschungszentrum Telekommunikation Wien (FTW) di Vienna

Limiti dello standard IEEE 802.11:

- ▶ comunicazioni simultanee non possibili (throughput limitato)
- ▶ protocolli proposti in letteratura non retro-compatibili



Sviluppo di algoritmi di accesso multiplo:

- ▶ aumento del throughput della rete (comunicazioni simultanee)
- ▶ retro-compatibilità
- ▶ possibilità di accesso asincrono

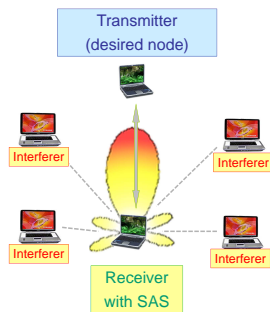
Reti wireless eterogenee distribuite, link tra diverse coppie di nodi

Uno o più canali wireless sui quali operano:

- ▶ nodi legacy, antenne omnidirezionali
- ▶ nodi non-legacy, sistemi di antenne intelligenti (smart antenna system - SAS)

Sistemi di antenne intelligenti:

- ▶ schiera di elementi radianti, unità di beamforming e di elaborazione dei segnali
- ▶ mitigazione di sorgenti interferenti (massimizzazione rapporto segnale-interferenza (SIR))
- ▶ riutilizzo spaziale dello spettro di frequenza



Tecniche di sviluppo per protocolli che utilizzano SAS:

- ▶ trasmissioni omnidirezionali
- ▶ nodi non-legacy possono operare anche su più canali
- ▶ nodi non-legacy in grado di raccogliere e disseminare informazioni con pacchetti modificati

Sviluppo di due protocolli di accesso al canale wireless:

- ▶ nodi equipaggiati con SAS
- ▶ accesso consentito solo se la nuova trasmissione non deteriora le comunicazioni esistenti

### Protocolli <sup>2</sup>:

- ▶ Threshold Access MPC (TAMPC)
  - ▶ criterio di accesso basato sul numero di comunicazioni simultanee attive
  - ▶ il nodo è a conoscenza del numero di comunicazioni sostenibili da ogni nodo attivo
  - ▶ decisione → SAS determina il numero di comunicazioni attive
  - ▶ modello per la valutazione delle prestazioni
- ▶ SIR Access MPC (SAMPC)
  - ▶ criterio di accesso basato sul rapporto segnale-interferenza
  - ▶ decisione → stima del SIR percepito da ogni nodo attivo

---

<sup>2</sup>F. Babich, M. Comisso, A. Crismani, and A. Dorni, "On the Design of MAC Protocols for Multi-Packet Communication in IEEE 802.11 Heterogeneous Networks Using Adaptive Antenna Arrays", major revision on IEEE Trans. on Mobile Computing.

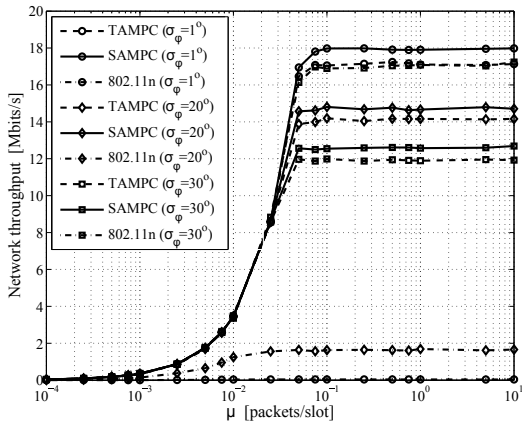
### Simulatori:

- ▶ Network Simulator 2 (ns2):
  - ▶ event-based
  - ▶ estensione SAS in MATLAB e Octave <sup>3</sup>
- ▶ C++:
  - ▶ time-based
  - ▶ estensione SAS con librerie IT++
- ▶ procedure per il calcolo del tasso sostenibile del codice (codifica di canale)
- ▶ modellizzazione del block Rayleigh fading
- ▶ modellizzazione dell'effetto per percorsi multipli

---

<sup>3</sup>F. Babich, M. Comisso, A. Dorni, F. Barisi, M. Driusso, and A. Manià, "Discrete-Time Simulation of Smart Antenna Systems in Network Simulator-2 Using MATLAB and Octave", Simulation: Trans. of The Society for Modeling and Simulation International, Vol. 87, No. 11, pp. 932 - 946, Nov. 2011.

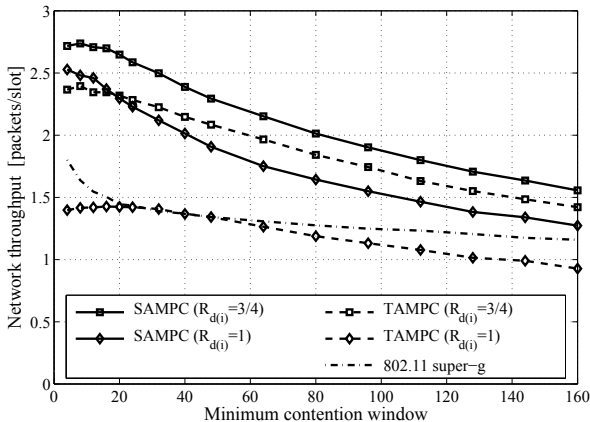
- ▶ Valutazione eseguita per 50 topologie random
- ▶ SAMPC e TAMPC presentano prestazioni migliori rispetto allo standard IEEE 802.11n per bassi valori dello spread angolare  $\sigma_\varphi$





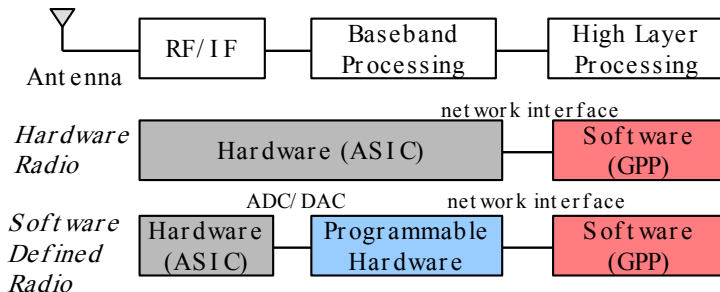
## MPC – Risultati (II)

- ▶ Valutazione eseguita per 50 topologie random
- ▶ SAMPC presenta prestazioni migliori rispetto a TAMPC e IEEE 802.11 super-g



- ▶ introdotto negli anni 60 per applicazioni militari (costi elevati)
  - ➔ rappresenta una soluzione adeguata per il design di rice-trasmittitori (costi, tecnologia)
- ▶ elaborazione dei segnali in banda base implementata su hardware dedicato (ASICs)
  - ➔ 1. FPGA o DSP; 2. schede di acquisizione + Pc; utilizzati per l'elaborazione software dei segnali in banda base

### *Radio architecture*



### Principali vantaggi del SDR

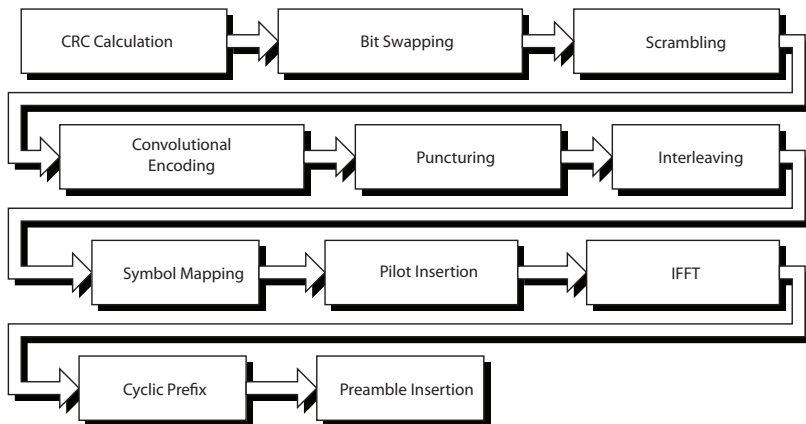
**riconfigurabilità:** lo stesso frontend in radio frequenza utilizzabile su diversi sistemi radio

**modularità:** i diversi blocchi o componenti riutilizzabili in diversi sistemi di rice-trasmissione

**procedure di test:** più dinamiche, test affidabili dei sistemi completi possono essere effettuati in ambienti reali

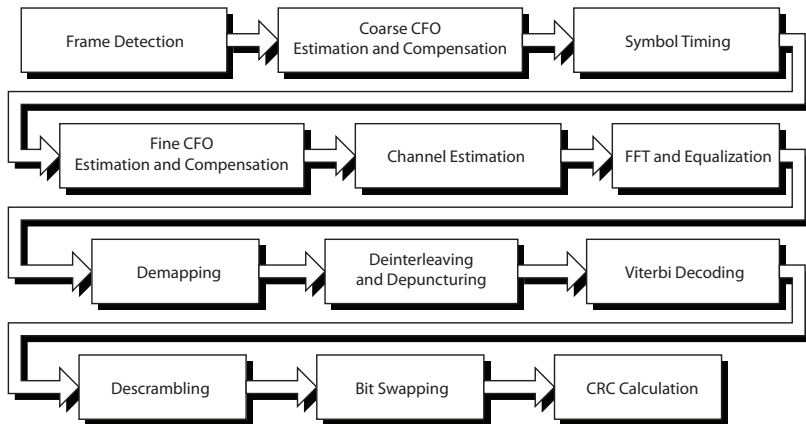
### Personalizzazione della pila protocollare

- ▶ per far fronte alle limitazioni dell'hardware in commercio (pile protocollari PHY/MAC non modificabili, nessun codice sorgente disponibile, etc)
- ▶ spesso le simulazioni non sono esaustive
  - ➔ sistemi di rice-trasmissione più evoluti possono essere sviluppati totalmente da zero, o sopra i livelli fisici standard già noti



- Elaborazione dei segnali in banda base, solo livello fisico

## SDR – IEEE 802.11 – Catena di ricezione OFDM



- Il blocco di Frame Detection inoltra il flusso nella catena di ricezione

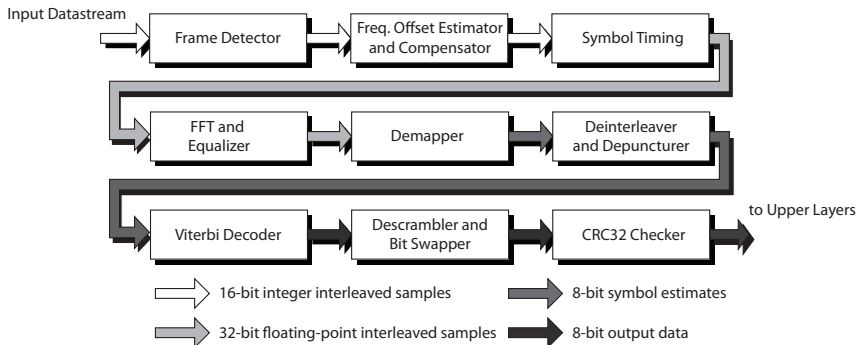
Elaborazione in tempo reale ottenuta grazie a:

- ▶ ottimizzazioni con istruzioni (Single-Instruction Multiple-Data) SIMD
  - ➔ vettorizzazione (dati elaborati in gruppi e non separatamente)
- ▶ utilizzo di Look-up Table per incrementare le prestazioni delle operazioni su gruppi di bit
- ▶ utilizzo di strutture dati che non superino la dimensione della cache di secondo livello
- ▶ inutilizzo di complesse macchine a stati e di istruzioni di test
- ▶ sostituzione delle funzioni trascendentali con funzioni polinomiali più veloci
- ▶ scrittura di codice ottimizzato in termini di prestazioni (Deinterleaver, Descrambler)
- ▶ utilizzo di codice generato automaticamente (FFT, Viterbi decoder)<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup><http://www.spiral.net>

### Flusso dati dal frontend in radio frequenza



Flusso dati nella catena di ricezione, livello MAC non incluso.<sup>5</sup>

<sup>5</sup>G. Zacheo, D. Djukic, A. Dorni, F. Babich, and F. Ricciato, "A Software-Defined Radio Implementation of an 802.11 OFDM Physical Layer Transceiver", IEEE Emerging Technologies & Factory Automation Conf., Krakow, Poland, 17-21 Sept. 2012.

### Scenario Hardware/Software:

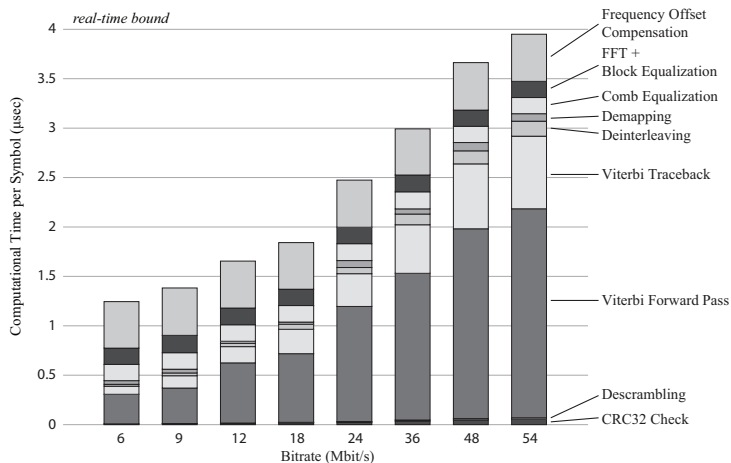
- ▶ Intel i5/660 con il clock a 3.47 GHz, sistema operativo Linux 3.2.0
- ▶ esecuzione del processo nello spazio utente, implementazione a singolo thread
- ▶ larghezza di banda richiesta  $> 80$  MBytes/s (20 Mcampioni/s \* campioni complessi (16-bit I, 16-bit Q))

### Ettus Research USRP N210:

- ▶ piattaforma SDR con interfacciamento porta Ethernet
- ▶ UHD: driver dedicati per applicazioni in C++
- ▶ facilmente utilizzabile con il framework GNURadio
- ▶ ampia scelta di frontend in radio frequenza intercambiabili

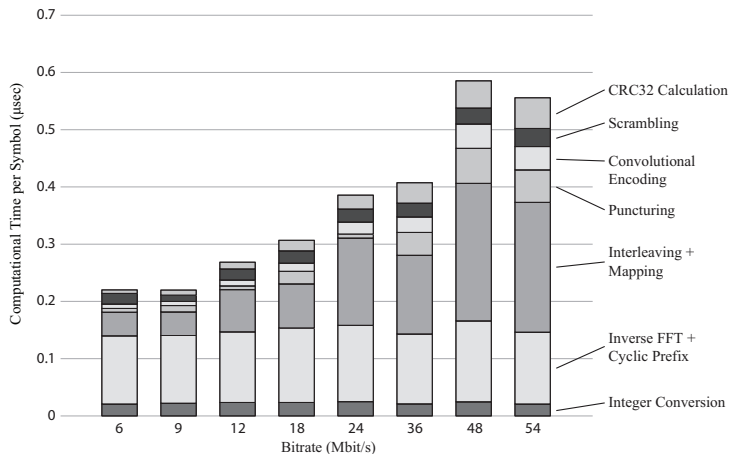


## SDR – Risultati (II)



- ▶ La massima larghezza di banda richiesta dell'802.11a/g è di 20MHz, per cui la durata del simbolo corrisponde a  $4 \mu s$

## SDR – Risultati (III)



- ▶ In trasmissione l'elaborazione in tempo reale è facilmente ottenibile

### MPC:

- ▶ elevate prestazioni grazie alla strategia di desing dei protocolli
- ▶ protocolli proposti presentano incremento del throughput mantenendo la retrocompatibilità

### SDR:

- ▶ sistema completo di rice-trasmissione può essere implementato su Intel/AMD workstations
- ▶ vincoli di real-time possono essere rispettati su architetture attuali
- ▶ sviluppi futuri: sviluppo di nodi "smart" indipendenti grazie a nuove architetture che uniscono CPU e FPGA sullo stessa scheda (e.g. Xilinx Zynq)

# Lista delle pubblicazioni (I)

## Articoli su rivista:

F. Babich, M. Comisso, E. Valentinuzzi, A. Dorni, A. Suriano, and M. Davanzo, "Numerical and Experimental Characterization of Antenna Positioning in a Dual-Radio Mesh Router", *AEU International Journal of Electronics and Communications*, DOI:10.1016/j.aeue.2011.08.001.

F. Babich, M. Comisso, M. D'Orlando, and A. Dorni, "Deployment of a Reliable 802.11e Experimental Setup for Throughput Measurements", *Wiley Wireless Communications and Mobile Computing*, DOI:10.1002/wcm.1026.

F. Babich, M. Comisso, A. Dorni, F. Barisi, M. Driusso, and A. Manià, "Discrete-Time Simulation of Smart Antenna Systems in Network Simulator-2 Using MATLAB and Octave", *Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*, DOI:10.1177/0037549710387762.

F. Babich, M. Comisso, A. Crismani, and A. Dorni, "On the Design of MAC Protocols for Multi-Packet Communication in IEEE 802.11 Heterogeneous Networks Using Adaptive Antenna Arrays", major revision on *IEEE Trans. on Mobile Computing*.

## Atti di conferenze internazionali:

F. Babich, M. Comisso, A. Dorni, and M. Driusso, "Open Source Simulation of Smart Antenna Systems in Network Simulator-2 Using Octave", in *IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC)*, Modena, Italy, 5-7 May 2010.

F. Babich, M. Comisso, and A. Dorni, "A Practical Method for Verifying the Uniformity of the Backoff Distribution in 802.11 Network Cards", in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Cape Town, South Africa, 23-27 May 2010.

### Atti di conferenze internazionali: (continua)

A. Dorni, F. Babich, and M. Comisso, "Numerical Implementation of Multi-Packet Reception for the IEEE 802.11 MAC/PHY Layers", in EuroNF Workshop on Wireless and Mobility in the Network of the Future, Como (Italy), 21-22 Jun. 2010.

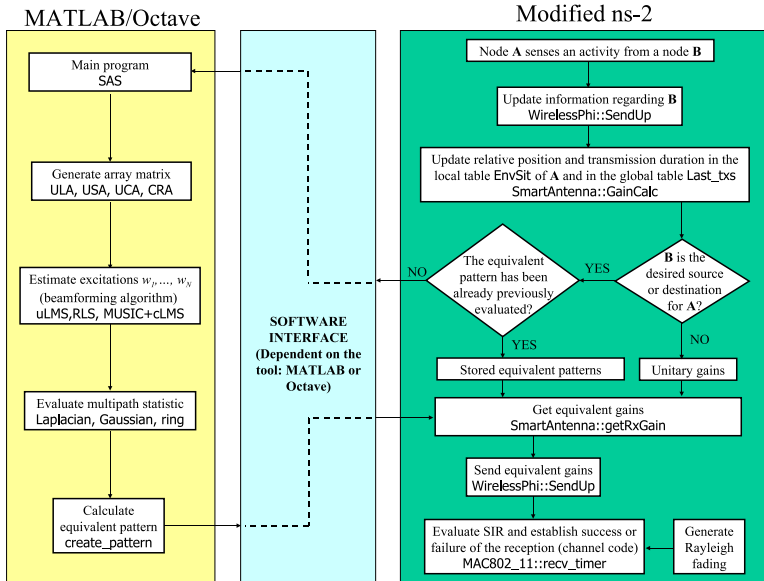
F. Babich, M. Comisso, and A. Dorni, "A PHY Design for Asynchronous Multi-Packet Reception in 802.11 Heterogeneous Networks", in IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Budapest, Hungary, 15-18 May 2011.

F. Babich, M. Comisso, and A. Dorni, "Multi-Packet Communication in 802.11 Networks: A MAC/PHY Backward Compatible Solution", in IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Houston, Texas (USA), 4-9 Dec. 2011.

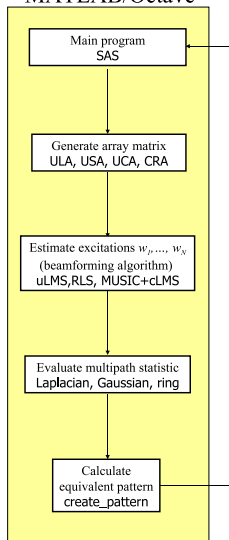
F. Babich, M. Comisso, and A. Dorni, "A Novel SIR-Based Access Scheme for Multi-Packet Communication in 802.11 Networks", in IEEE International Conference on Communications (ICC), Ottawa, Canada, 10-15 Jun. 2012.

G. Zacheo, D. Djukic, A. Dorni, F. Babich, and F. Ricciato, "A Software-Defined Radio Implementation of an 802.11 OFDM Physical Layer Transceiver", in IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), Krakow, Poland, 17-21 Sept. 2012.

F. Babich, M. Comisso, A. Crismani, and A. Dorni, "Multi-Packet Communication in 802.11 Networks by Spatial Reuse: from Theory to Protocol", accepted on IEEE International Conference on Communications (ICC) 2013.



## MATLAB/Octave

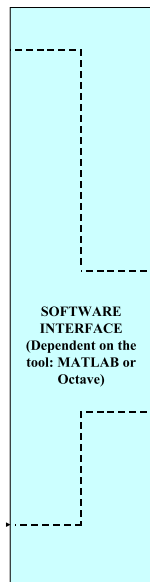


MATLAB e Octave adottano sostanzialmente la stessa sintassi

Approccio a tempo-discreto

Estensione MATLAB/Octave:

- ▶ prende in considerazione diverse geometrie del sistema di antenne
- ▶ stima i "pesi" da applicare agli elementi della schiera in base a diversi algoritmi di beamforming
- ▶ prende in considerazione gli effetti dei percorsi multipli e dell'angolo di spread
- ▶ calcola in diagramma di radiazione equivalente



### MATLAB:

- ▶ script MATLAB convertito in linguaggio C++ con MATLAB Compiler
- ▶ sorgenti C++ incluse nelle sorgenti ns2
- ▶ ottime prestazioni dovute a MATLAB e interfacciamento diretto

### Octave:

- ▶ sviluppate diverse tecniche di interfacciamento
- ▶ tecnica migliore: comunicazione tra Octave e ns2 grazie a FIFO pipes
- ▶ prestazioni inferiori, soluzione completamente open-source