



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

CROSS-LAYER DESIGN AND ANALYSIS OF COOPERATIVE WIRELESS NETWORKS RELYING ON EFFICIENT CODING TECHNIQUES

Anno Accademico 2011/2012

DOTTORANDO

Alessandro Crismani

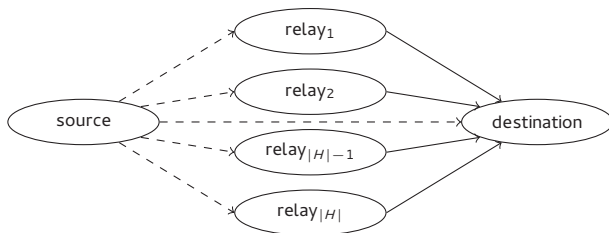
RELATORE

Chiarissimo Prof. Fulvio Babich

**Dipartimento di Ingegneria ed Architettura
Università di Trieste – Italy**

- ▶ Codifica distribuita
- ▶ Protocolli di accesso multiplo cooperativi
- ▶ Protocolli di accesso multiplo basati su nodi con più antenne

Utilizzano l'aiuto di stazioni estranee alla comunicazione (relay)



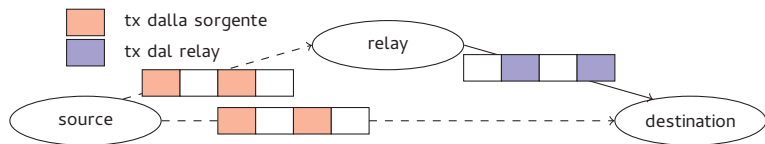
Studiati e sviluppati principalmente al livello fisico

- ▶ schemi di co-decodifica distribuita

Adottati anche in schemi di accesso multiplo

- ▶ incremento del throughput quando il relay ha un canale con qualità migliore
- ▶ riduzione della probabilità di outage quando il link diretto ha una bassa qualità

Il relay decodifica il messaggio della sorgente e inoltra nuova informazione



Molte soluzioni presenti in letteratura, tuttavia:

- ▶ schemi adatti solo per particolari topologie di rete
- ▶ schemi sbilanciati (sorgente usa codice efficiente, relay no)
- ➔ **dottorato: progetto di codici "efficienti" ed "universali"**

Analisi delle prestazioni basata sulla capacità di canale

- ▶ Non considera quanti bit vengono inviati (assume blocco infinito)
- ▶ Il calcolo è complesso, specialmente per più ritrasmissioni
- ➔ **dottorato: analisi di schemi cooperativi a più trasmissioni**

Consente di calcolare la probabilità di errata decodifica in termini di:

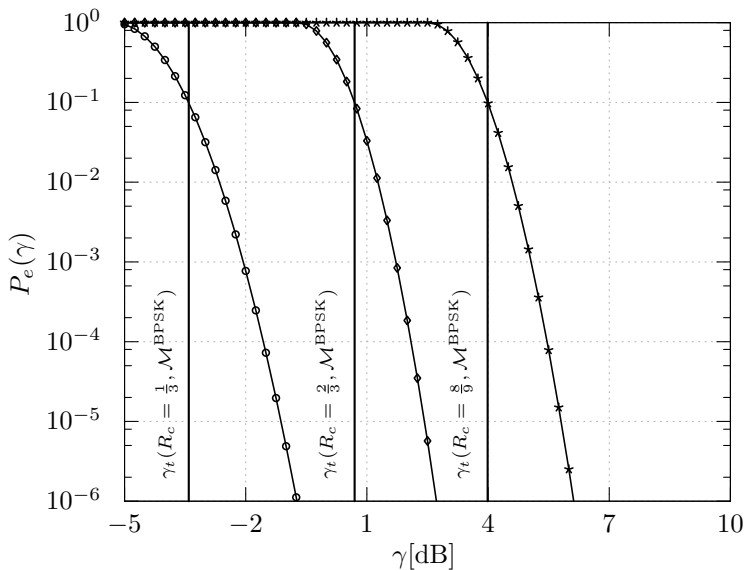
- ▶ Numero di bit trasmessi (lunghezza di blocco) N
 - ▶ Modulazione utilizzata M
 - ▶ Tasso del codice R_c
 - ▶ SNR γ
- ➔ $P_e = P_e(N, R_c, M, \gamma)$

Codici efficienti (LDPC, turo codici): prestazioni entro 1 dB dallo SPB

Fissati R_c e M , la curva $P_e = P_e(\gamma)$ decresce molto rapidamente:

- ▶ approssimare $P_e(\gamma)$ con un modello ON-OFF $\tilde{P}_e(\gamma)$ [L1]
- ▶ se $\gamma < \gamma_t$ la decodifica fallisce ($\tilde{P}_e = 1$), altrimenti ha successo ($\tilde{P}_e = 0$)
- ▶ γ_t è calcolata con lo SPB come $\gamma_t = P_e^{-1}(0.1)$

Esempio per una modulazione BPSK e diversi tassi di codifica



Sistemi ripetitivi: stessi bit ricevuti da S e R con SNR γ_{SD} and γ_{RD}

- ▶ Sorgente e relay usano la stessa modulazione

- ▶ Successo se $\gamma_{SD} + \gamma_{RD} > \gamma_t \iff \gamma_{RD} > \gamma_t \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_t}\right)$

- ▶ Sorgente e relay usano modulazioni diverse

$$\gamma_{t_{SD}} \rightarrow P_e(N, R_c, M_{SD}, \gamma_{t_{SD}}) = 0.1, \gamma_{t_{RD}} \rightarrow P_e(N, R_c, M_{RD}, \gamma_{t_{RD}}) = 0.1$$

- ▶ Interpolazione lineare tra le soglie dei due collegamenti
 - ▶ Successo se $\gamma_{RD} > \gamma_{t_{RD}} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{t_{SD}}}\right)$

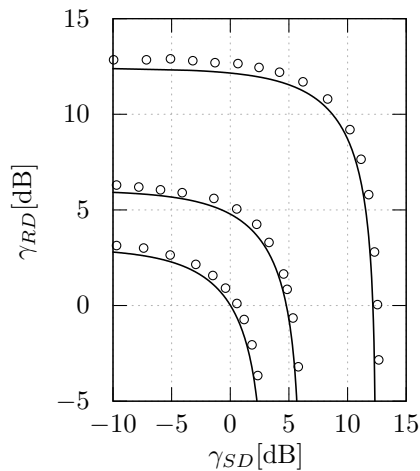
Schemi incrementali, S e R trasmettono diversi bit

- ▶ Bit divisi in gruppi: ogni gruppo contiene bit inviati lo stesso numero di volte da S e R con gli stessi SNR
- ▶ Si definisce tasso equivalente il tasso di codifica r tale che:

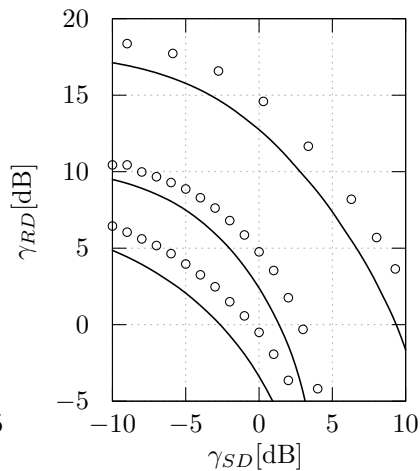
$$\gamma_{RD} = \gamma_{t_{RD}} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{t_{SD}}}\right)$$

- ▶ Successo: tasso equivalente medio superiore al tasso di codifica

Probabilità d'errore: confronto analisi e prestazioni simulate



(a) repetition - same modulations



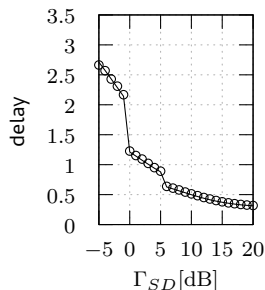
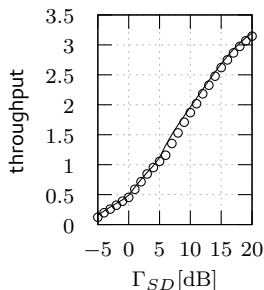
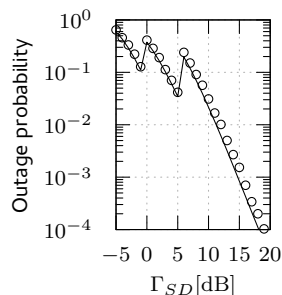
(b) incremental - different modulations

Sphere-Packing Bound: prestazioni della rete

Ottenute le soglie di successo per l' n-ma trasmissione si possono calcolare throughput, outage e ritardo medio della rete [1]

Esempio:

- ▶ S trasmette con qualità media Γ_{SD}
- ▶ R inoltra due volte con qualità media $\Gamma_{SD} + 4.5$ dB
- ▶ Rayleigh fading a blocco modifica la qualità istantanea dei link



[1] Babich et al. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Jan. 2012

Obiettivo

- ▶ codici con prestazioni vicine allo SPB per ogni condizione di canale
- ▶ adatti a diverse topologie di rete

Utilizzati turbo-codici non sistematici perforati (trasmettono solo alcuni bit da un set di bit prodotti dal codificatore)

- ▶ schemi bilanciati (codici di S e R hanno stesse prestazioni)
- ▶ prestazioni vicino alla capacità del singolo link
- ▶ possibile cambiare tasso senza modificare il co-decodificatore

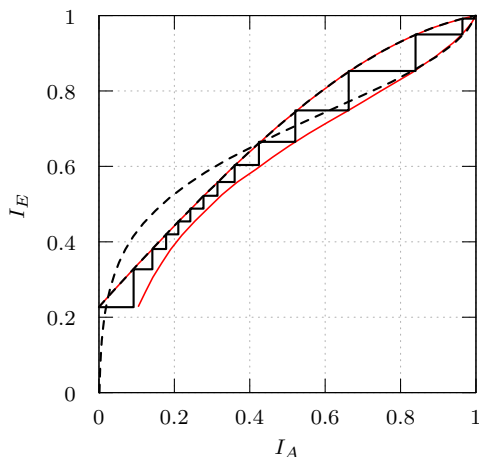
Progetto di codici distribuiti efficienti

- ▶ come valutare le prestazioni del singolo tentativo?
- ▶ come scegliere i bit da inviare nei vari tentativi?

EXIT chart: calcolano la soglia di decodifica di codici iterativi

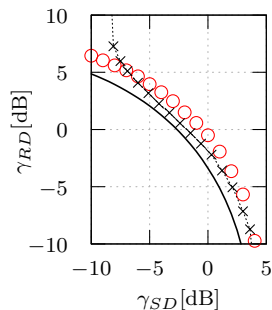
EXIT chart tradizionali non adeguate a codici non sistemati

➔ Proposte nuove EXIT chart 3D per codici non sistemati [2]

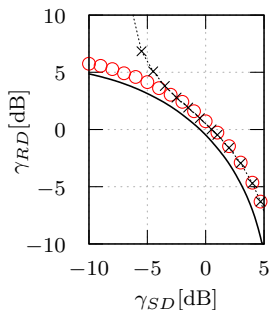


Proposto un algoritmo genetico per ottenere schemi bilanciati [1]

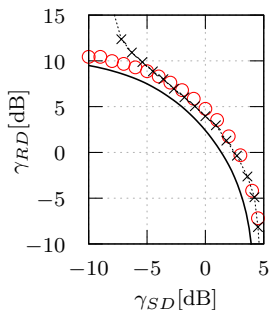
- ▶ lavora a a passi: passo $n \rightarrow$ codice per la n -ma ripetizione
- ▶ i codici sono mutati ad ogni iterazione, cambiando i bit inviati
- ▶ “sopravvivono” i codici con prestazioni migliori
 - ▶ soglia di convergenza dei codici più basse
 - ▶ minor numero di bit ripetuti



(f) BPSK-QPSK

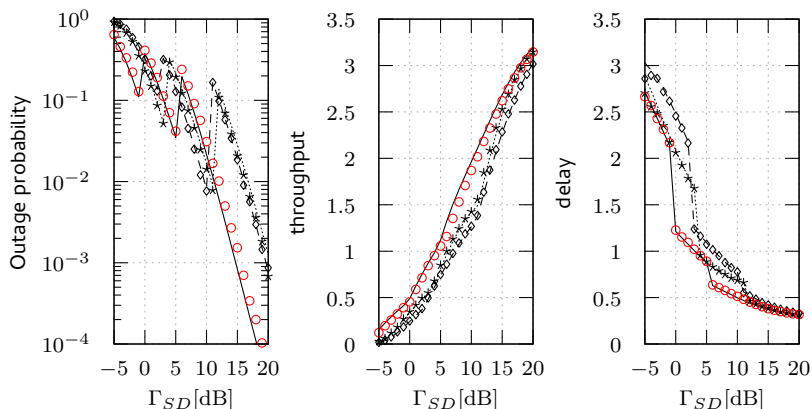


(g) QPSK-QPSK



(h) QPSK-16QAM

Turbo codici distribuiti – prestazioni del sistema



Codici bilanciati (\circ) hanno prestazioni superiori rispetto a:

- ▶ codici ripetitivi (\star)
- ▶ tecniche non cooperative (\diamond)

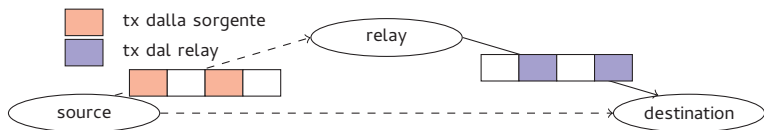
Protocolli di accesso multiplo cooperativi: introduzione e letteratura

Protocolli di accesso cooperativi: quando e con chi cooperare?

- ▶ benefici per throughput e probabilità di outage

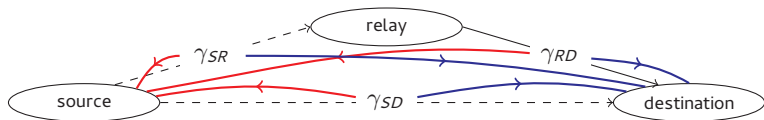
Limiti dei protocolli e dei modelli teorici in letteratura

- ▶ modello di canale ideale e protocolli senza codifica distribuita



➡ dottorato: protocolli cross-layer con codifica distribuita

- ▶ conoscenza ideale dello stato del canale tra i nodi della rete



➡ dottorato: tecniche di Markov con canale non noto

Sviluppati protocolli che integrano tecniche di codifica distribuita [3,4]

Nuova modalità di scelta del relay che considera i benefici della codifica

- ▶ scelta del relay e della modalità di trasmissione più aggressivi
- ▶ relay modulazione scelti dipendono dal link sorgente-destinatario
- ➔ nuova soglia $\Gamma_r^{M_{r,d}} | \gamma_{sd}, M_{sd} = P_e(\gamma_{sd}, M_{sd})$

Modello teorico con livello fisico dettagliato per schemi cross-layer [4]

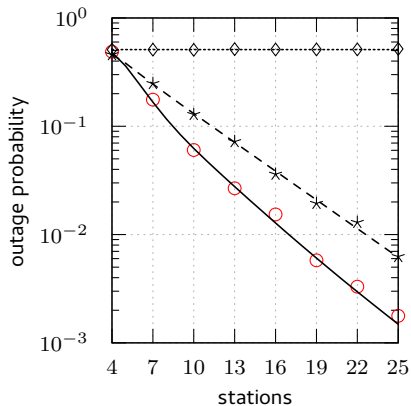
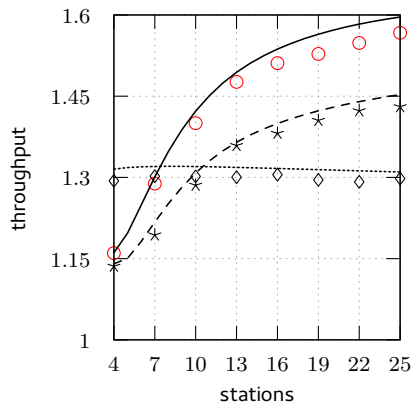
- ▶ estende il modello di Bianchi [L2]
- ▶ basato sullo Sphere-Packing Bound
- ▶ include outage e trasmissioni adattative calcolando la durata media di una comunicazione

[3] F. Babich, A. Crismani and L. Hanzo; IEEE Vehicular Technology Conf., May 2010

[4] F. Babich and A. Crismani; IEEE Vehicular Technology Conf., May 2011

[L2] G. Bianchi; IEEE J. on Selected Areas in Communications, March 2000

Protocolli cross-layer: prestazioni



Protocollo cross-layer (○) ha prestazioni migliori di:

- ▶ protocolli senza codifica distribuita (★)
- ▶ protocolli non cooperativi (◇)

Modello teorico (linee) molto vicino alle prestazioni simulate

I protocolli precedenti assumono che i nodi conoscano la qualità istantanea dei collegamenti della rete

- ▶ non realistico in reti wireless, canale varia per multipath e mobilità

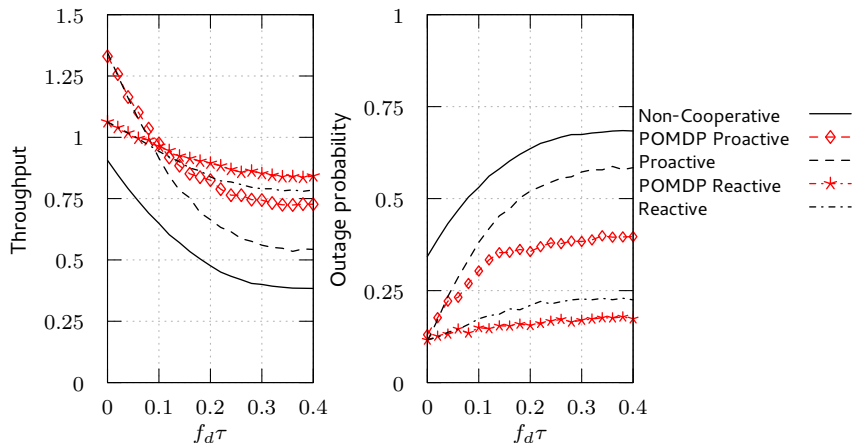
Prestazioni se il canale è noto in ritardo e in modo imperfetto

- ▶ qualità $\gamma(t_n)$ quantizzata $\rightarrow \hat{\gamma}(t_n)$
- ▶ evoluzione Markoviana caratterizzata da $P\{\hat{\gamma}(t_{n+1}) = j | \hat{\gamma}(t_n) = i\} = t_{ij}$
- ▶ i protocolli al tempo t_n conoscono $\tilde{\gamma}(t_{n-\tau})$

Sviluppati protocolli che predicono il canale attuale [5]

- ▶ usano Partially Observable Markov Decision Processes (POMDP)
- ▶ stimano lo stato attuale $\hat{\gamma}(t_n)$ da $\tilde{\gamma}(t_{n-\tau})$
- ▶ ottimizzano la ricompensa attribuita alla scelta di un relay e di una modalità di trasmissione

Accesso multiplo con conoscenza imperfetta del canale: risultati



Degrado delle prestazioni se il canale è noto in ritardo

- ➡ i protocolli con predizione POMDP riducono il degrado
- ➡ protocolli reattivi adatti se il canale è "poco noto", protocolli proattivi adatti se la conoscenza è "buona"

Reti 802.11 classiche: un solo nodo trasmette alla volta

- ▶ trasmissioni contemporanee falliscono per mutua interferenza

Antenne intelligenti: creano diagrammi di radiazione direttivi

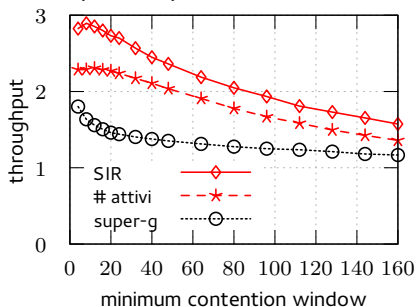
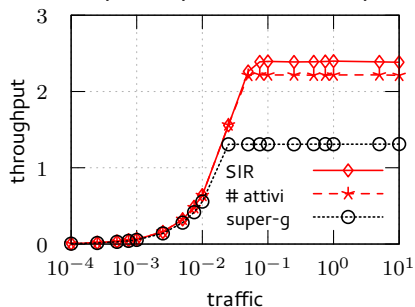
- ▶ consentono di ridurre la potenza ricevuta da interferenti

Simulati protocolli MAC che integrano antenne intelligenti

- ▶ retrocompatibili con lo standard 802.11
- ▶ un protocollo più semplice consente ad un numero massimo di nodi di trasmettere contemporaneamente
- ▶ un protocollo più avanzato stima il rapporto segnale/interferenza dei (SIR) nodi attivi
 - ➔ il nodo accede se non "rovina" le trasmissioni degli altri nodi

Simulate le prestazioni dei due protocolli [6]

Modello per le prestazioni del protocollo più semplice [7]



- ▶ Protocollo con stima del SIR ha prestazioni migliori
- ▶ Entrambi i protocolli offrono prestazioni migliori della rete 802.11

[6] F. Babich, M. Comisso, A. Crismani and A. Dorni; submitted to IEEE Trans. on Mobile Computing

[7] F. Babich, M. Comisso, A. Crismani and A. Dorni; accepted, IEEE Int. Conf. on Communications, 2013

Studiate le prestazioni di schemi cooperativi al livello fisico

- ▶ Analisi di schemi ritrasmissivi basati su codici efficienti
- ▶ Progetto di codici distribuiti con prestazioni prossime al limite

Cooperazione in protocolli di accesso multiplo

- ▶ Progettati e studiati schemi cross-layer che taggono beneficio dalla codifica distribuita
- ▶ Studiate le prestazioni di algoritmi di selezione del relay con conoscenza imperfetta del canale
- ▶ Sviluppate algoritmi in grado di predirre lo stato attuale della rete a partire da stime corrotte di uno stato passato

Nodi con sistemi avanzati di antenna

- ▶ Proposti e simulati protocolli retro-compatibili che sfruttano smart-antenna per migliorare le prestazioni della rete

Journal papers

- ▶ 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" *submitted to IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2012
- ▶ F. Babich, A. Crismani, M. Driusso and L. Hanzo "Design Criteria and Genetic Algorithm Aided Optimization of Three-Stage-Concatenated Space-Time Shift Keying Systems" *IEEE Signal Processing Letters*, 2012
- ▶ F. Babich, A. Crismani, "Cooperative Coding Schemes: Design and Performance Evaluation" *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2012
- ▶ F. Babich, A. Crismani and R.G.Mauder, "EXIT Charts of Periodically Punctured Codes", *IET Electronics Letters*, 2010

Conference papers

- ▶ F. Babich, M. Comisso, A. Crismani and A. Dorni "Multi-Packet Communication in 802.11 Networks by Spatial Reuse: from Theory to Protocol" *accepted, IEEE Int. Conf. on Communications*, 2013
- ▶ F. Babich, A. Crismani and L. Hanzo, "Relay Selection Schemes Relying on Adaptive Modulation and Imperfect Channel Knowledge for Cooperative Networks", *IEEE Int. Conf. on Communications*, 2012
- ▶ F. Babich and A. Crismani, "Incremental and Complementary Coding Techniques for Cooperative Medium Access Control Protocols", *IEEE Vehicular Technology Conf.*, 2011
- ▶ F. Babich, A. Crismani and L. Hanzo, "Cross-Layer Solutions for Cooperative Medium Access Control Protocols" *IEEE Vehicular Technology Conf.*, 2010

Sphere-Packing Bound: codifica distribuita e più trasmissioni

Schemi incrementali, S e R trasmettono diversi bit

- ▶ codifica distribuita

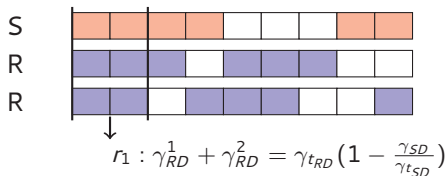
Estensione del modello

- ▶ Successo si basa sul tasso equivalente, r , tale che:

$$\gamma_{RD} = \gamma_{tRD} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{tSD}}\right)$$

Esempio:

- ▶ S trasmette con qualità γ_{SD}
- ▶ R inoltra due volte con qualità γ_{RD}^1 e γ_{RD}^2



Sphere-Packing Bound: codifica distribuita e più trasmissioni

Schemi incrementali, S e R trasmettono diversi bit

- ▶ codifica distribuita

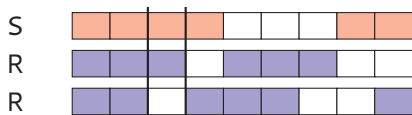
Estensione del modello

- ▶ Successo si basa sul tasso equivalente, r , tale che:

$$\gamma_{RD} = \gamma_{t_{RD}} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{t_{SD}}}\right)$$

Esempio:

- ▶ S trasmette con qualità γ_{SD}
- ▶ R inoltra due volte con qualità γ_{RD}^1 e γ_{RD}^2



$$r_2 : \gamma_{RD}^1 = \gamma_{t_{RD}} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{t_{SD}}}\right)$$

Sphere-Packing Bound: codifica distribuita e più trasmissioni

Schemi incrementali, S e R trasmettono diversi bit

- ▶ codifica distribuita

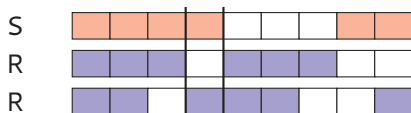
Estensione del modello

- ▶ Successo si basa sul tasso equivalente, r , tale che:

$$\gamma_{RD} = \gamma_{t_{RD}} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{t_{SD}}}\right)$$

Esempio:

- ▶ S trasmette con qualità γ_{SD}
- ▶ R inoltra due volte con qualità γ_{RD}^1 e γ_{RD}^2



$$r_3 : \gamma_{RD}^2 = \gamma_{t_{RD}} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{t_{SD}}}\right)$$

Sphere-Packing Bound: codifica distribuita e più trasmissioni

Schemi incrementali, S e R trasmettono diversi bit

- ▶ codifica distribuita

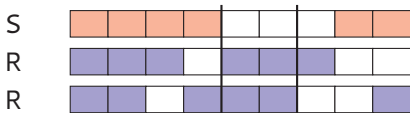
Estensione del modello

- ▶ Successo si basa sul tasso equivalente, r , tale che:

$$\gamma_{RD} = \gamma_{t_{RD}} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{t_{SD}}}\right)$$

Esempio:

- ▶ S trasmette con qualità γ_{SD}
- ▶ R inoltra due volte con qualità γ_{RD}^1 e γ_{RD}^2



$$r_4 : P_e(N, r_4, M_{RD}, \gamma_{RD}^1 + \gamma_{RD}^2) = 0.1$$

Sphere-Packing Bound: codifica distribuita e più trasmissioni

Schemi incrementali, S e R trasmettono diversi bit

- ▶ codifica distribuita

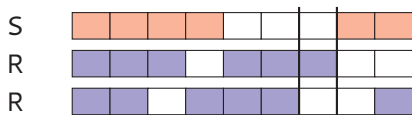
Estensione del modello

- ▶ Successo si basa sul tasso equivalente, r , tale che:

$$\gamma_{RD} = \gamma_{t_{RD}} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{t_{SD}}}\right)$$

Esempio:

- ▶ S trasmette con qualità γ_{SD}
- ▶ R inoltra due volte con qualità γ_{RD}^1 e γ_{RD}^2



$$r_5 : P_e(N, r_5, M_{RD}, \gamma_{RD}^1) = 0.1$$

Sphere-Packing Bound: codifica distribuita e più trasmissioni

Schemi incrementali, S e R trasmettono diversi bit

- ▶ codifica distribuita

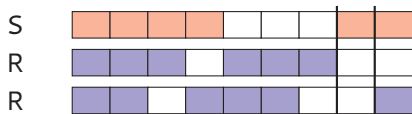
Estensione del modello

- ▶ Successo si basa sul tasso equivalente, r , tale che:

$$\gamma_{RD} = \gamma_{t_{RD}} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{t_{SD}}}\right)$$

Esempio:

- ▶ S trasmette con qualità γ_{SD}
- ▶ R inoltra due volte con qualità γ_{RD}^1 e γ_{RD}^2



$$r_6 : P_e(N, r_6, M_{SD}, \gamma_{SD}) = 0.1$$

Sphere-Packing Bound: codifica distribuita e più trasmissioni

Schemi incrementali, S e R trasmettono diversi bit

- ▶ codifica distribuita

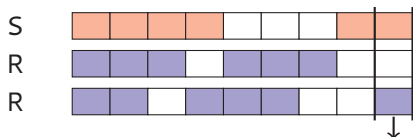
Estensione del modello

- ▶ Successo si basa sul tasso equivalente, r , tale che:

$$\gamma_{RD} = \gamma_{tRD} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{tSD}}\right)$$

Esempio:

- ▶ S trasmette con qualità γ_{SD}
- ▶ R inoltra due volte con qualità γ_{RD}^1 e γ_{RD}^2



$$r_7 : \gamma_{RD}^2 = \gamma_{tRD} \left(1 - \frac{\gamma_{SD}}{\gamma_{tSD}}\right)$$

Success if $R_c < \sum r_i L_i$

Il relay inoltra nuova informazione e il destinatario opera una decodifica congiunta

- ▶ Prestazioni di decodifica superiori

L'algoritmo adattativo al relay considera i benefici della decodifica congiunta

- ▶ nuova soglia per scegliere la modulazione al relay
- ▶ algoritmo adattativo basato sullo SPB
 - ➔ soglia $\Gamma_r^{M_{rd}} | \gamma_{sd}, M_{sd} = \text{SPB}(\gamma_{sd}, M_{sd})$

L'accesso considera situazioni di outage

- ▶ Nessuna modulazione è utilizzabile ➔ stazione continua il backoff

Estensione del modello proposto da Bianchi [L2]

- ▶ una catena di Markov usata come modello di backoff $\rightarrow P(i, k)$
 i è lo stato di backoff, k è il backoff counter
- ▶ probabilità di collisione $p = 1 - (1 - \tau)^{N-1}$ non dipende dallo stato del backoff
 τ probabilità di trasmissione, N numero di stazioni

Considera situazioni di outage

- ▶ probabilità di trasmissione senza successo $P_f = (1 - P_{\text{out}})p + P_{\text{out}}$
- ▶ Probabilità che una stazione trasmetta
 $\tau = (1 - P_{\text{out}}) \frac{1 - P_f^{m+1}}{1 - P_f} P(i = 0, k = 0)$

Usata una durata media della trasmissione $\overline{T_S}$ che considera la cooperazione

Durata media della trasmissione

Trasmissione diretta: durata $T^{\text{dir}}|M_{sd}$ dipende da M_{sd}

$$\blacktriangleright P(M_{sd}) = P(\Gamma^{M_{sd}} < \gamma_{sd} < \Gamma^{M_{sd}+1})$$

Cooperazione: durata $T^{r_n}|M_{sr_n}, M_{r_n d}$ dipende da M_{sr_n} and $M_{r_n d}$

$$\begin{aligned}\blacktriangleright P(M_{sr_n}, M_{r_n d}|\gamma_{sd}) &= P(M_{r_n d}|M_{sr_n}, \gamma_{sd}) \cdot P(M^{sr_n}) = \\ &= P(\Gamma_r^{M_{r_n d}}|M_{sr_n}, \gamma_{sd} < \gamma_{r_n d} < \Gamma_r^{M_{r_n d}+1}|M_{sr_n}, \gamma_{sd}) \cdot P(M_{sr_n})\end{aligned}$$

Cooperazione con il relay $i = \underset{n \in \text{helpers}}{\text{argmin}}(T^{r_n})$ è usata se $T^{r_i} < T^{\text{dir}}$

$$\begin{aligned}\blacktriangleright \text{Sia } F^{\text{dir}}(\beta) &= P(T^{\text{dir}} \leq \beta), F^{r_n}(\beta) = P(T^{r_n}|\gamma_{sd} < \beta) \\ \Rightarrow P(T < \beta) &= 1 - \int_0^{+\infty} (1 - F^{\text{dir}}(\beta)) \prod_{n \in \text{helpers}} (1 - F^{r_n}(\beta)) f_{\gamma_{sd}}(\gamma_{sd}) d\gamma_{sd}\end{aligned}$$

La durata media $\overline{T_S}$ di una trasmissione con successo è

$$\blacktriangleright \overline{T_S} = \mathbb{E} \left[\frac{T}{1 - P_{\text{out}}} \right]$$

La probabilità di outage è calcolata come

$$\text{▶ } P_{\text{out}} = \int_0^{\frac{r^1}{\text{SNR}_{s,d}}} \prod_{n \in \text{helpers}} (P_{\text{out}}^{r_n} | \gamma_{s,d}) f_{\gamma_{s,d}}(\gamma_{s,d}) d\gamma_{s,d}$$

dove un relay è in outage con probabilità

$$P_{\text{out}}^{r_n} | \gamma_{s,d} = \sum_{i=0}^K P\{M_{sr_n}^i, M_{r_n d}^0 | \gamma_{s,d}\} + \sum_{j=1}^K P\{M_{sr_n}^0, M_{r_n d}^j | \gamma_{s,d}\}$$

Il throughput si ottiene come

$$\text{▶ } S = \frac{P_s P_{\text{tr}} E[P]}{E_s}$$

$E_s(\overline{T}_s, P_{\text{tr}}, P_s)$ tempo medio tra due decrementi del backoff counter

P_s probabilità di successo nello slot

P_{tr} probabilità che almeno un nodo trasmetta nello slot

$$\text{▶ } D = E_{\text{sn}} E_s$$

$E_{\text{sn}}(P_f)$ numero medio di slot in una trasmissione con successo

Un MDP è rappresentato da (S, A, T, r)

- ▶ S contiene gli stati del sistema
- ▶ A elenca le azioni possibili
- ▶ $T(s_i^{t_l}, a, s_j^{t_{l+1}}) : S \times A \times S \rightarrow \mathbb{R}$ sono le probabilità di transizione
- ▶ $r(s_i^{t_l}, a) : S \times A \rightarrow \mathbb{R}$ è la ricompensa ottenuta scegliendo l' a nello stato $s_i^{t_l}$

L'obiettivo è massimizzare la funzione di costo (ricompensa attesa)

$$J(\pi, s_i) = \mathbb{E}_{\pi}^{s_i} \left[\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r(s_i^k, a_{\pi}(s_i^k)) \right]$$

L'equazione di Bellman è usata per ottenere la ricompensa media[L3]

$$V^*(s_i) = \max_{a \in A} \left[r(s_i, a) + \gamma \sum_{s_j \in S} T(s_i, a, s_j) V^*(s_j) \right]$$

POMDP usano osservazioni $o \in \mathcal{O}$ dello stato del sistema

- ▶ probabilità di osservare o è $\Omega(s_i^{t_i}) : \mathcal{S} \times \mathcal{A} \rightarrow \Pi(\mathcal{O})$

La probabilità di essere in uno stato è aggiornata nel tempo

- ▶ probabilità di essere nello stato $s_i^{t_i-\tau}$ al tempo $t_i-\tau$ è:

$$b(s_i^{t_i-\tau}) = P(s_i^{t_i-\tau}) = \sum_{j=0}^K P(s_i^{t_i-\tau} | s_i^{t_i-\tau-1}) \tilde{b}(s_i^{t_i-\tau-1})$$

- ▶ dove $\tilde{b}(s_i^{t_i-\tau}) = \frac{P(o_j(t_i-\tau) | s_i^{t_i-\tau}) b(s_i^{t_i-\tau})}{P(o_j(t_i-\tau))}$ è la probabilità dello stato dopo averlo osservato
- ▶ la probabilità attuale è $b(\mathbf{s}^{t_i}) = P(\mathbf{s}^{t_i}) = \tilde{b}(\mathbf{s}^{t_i-\tau}) \cdot T^\tau$

Q-MDP sono usati per selezionare un'azione date le probabilità degli stati [11]

Un link u è nello stato $s_i^{t_l} \in \mathcal{S}_u$ al tempo t_l se $\hat{\gamma}_{(\cdot)}^{t_l} = c_i$

L'evoluzione del Fading del link u segue una Finite State Markov Chain (FSMC) [L5]

$$P(\hat{\gamma}_{(\cdot)}^{t_{l+1}} = c_j | \hat{\gamma}_{(\cdot)}^{t_l} = c_i) = t_u^{i,j}$$

Sistema cooperativo: $(1 + 2N)$ FSMC

- ▶ I possibili stati sono tutte le combinazioni degli stati dei singoli link

$$\rightarrow \mathbf{S} = \mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2 \times \cdots \times \mathcal{S}_{1+2N}$$

$$\rightarrow \mathbf{T}(\mathbf{s}^{t_l}, \mathbf{s}^{t_{l+1}}) = \prod_{u=1}^{1+2N} t_u^{s_i^{t_l}, s_j^{t_{l+1}}}$$

Schema proattivo: $1 + K + NK^2$ azioni

- ▶ la stazione non trasmette
- ▶ trasmissione diretta: scegliere tra K rate
- ▶ trasmissione cooperativa: scegliere uno dei N relay e una coppia di rate tra le K^2 coppie per i link SR e RD

Ricompensa: minimizzare la durata

$$\begin{aligned}
 r(\hat{\gamma}_{SD}^{t_i} = c_i, a = R_k) &= \\
 &= \begin{cases} R_k & c_i \geq \bar{\Gamma}_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
 r([\hat{\gamma}_{SD}^{t_i} = c_i, \hat{\gamma}_{SH_n}^{t_i} = c_j, \hat{\gamma}_{H_n D}^{t_i} = c_h], a = \{R_l^{sr_n}, R_m^{rd}\}) &= \\
 &= \begin{cases} \left(\frac{1}{R_l^{sr_n}} + \frac{1}{R_m^{rd}}\right)^{-1} & c_j \geq \bar{\Gamma}_l \wedge c_h \geq \bar{\Gamma}_m^{R_l^{sr_n}, c_i} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Schema reattivo: $1 + NK^2$ azioni

- ▶ la stazione non trasmette
- ▶ scelta di uno dei N relay e una coppia di rate tra le K^2 coppie per i link SD e RD

Ricompensa: priorità a trasmissioni dirette veloci e relay con migliori condizioni

$$r([\hat{\gamma}_{SD}^{t_l} = c_i, \hat{\gamma}_{SH_n}^{t_l} = c_j, \hat{\gamma}_{H_n D}^{t_l} = c_h], a = \{R_l^{sd}, R_m^{rd}\}) =$$

$$= \begin{cases} \left(\frac{1}{R_l^{sd}} + \frac{1}{R_m^{rd}}\right)^{-1} & c_i < \bar{\Gamma}_l \wedge c_j \geq \bar{\Gamma}_l \wedge c_h \geq \bar{\Gamma}_m^{R_l^{sd}, c_i} \\ R_l^{sd} + \alpha R_m^{rd} & c_i \geq \bar{\Gamma}_l \wedge c_j \geq \bar{\Gamma}_l \wedge c_h \geq \bar{\Gamma}_m^{R_l^{sd}, c_i} \\ R_l^{sd} & c_i \geq \bar{\Gamma}_l \wedge (c_j < \bar{\Gamma}_l \vee c_h < \bar{\Gamma}_m^{R_l^{sd}, c_i}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$