

Vincenzo Attanasio

- MiSE - ISCOM

- Università degli studi di
Roma Tor Vergata, Dip. di
Ingegneria Elettronica**Alessandro Valenti**

- Fondazione Ugo Bordoni

Arianna Rufini

- Fondazione Ugo Bordoni

Stefano Penna

- MiSE - ISCOM

- Università degli studi di
Roma Tor Vergata, Dip. di
Ingegneria Elettronica**Giacomo Verticale****Guido Maier**Politecnico di Milano, Dip. di
Elettronica, Informazione e
Bioingegneria**Anna Stefania Michelangeli**

MiSE - ISCOM

FTTx/VDSL2-Vectoring: prestazioni in una rete di accesso a banda ultra larga multi operatore

FTTx/VDSL2-Vectoring: performance in a multi operator ultra broadband access network

Sommario: L'agenda Digitale per l'Europa (DAE), all'interno della strategia "Europa 2020", fissa come obiettivi per il 2020 il target di 100 Mbit/s per la metà delle abitazioni europee. Al momento la miglior soluzione per raggiungere questo obiettivo è rappresentata dal Fibre To The Home (FTTH) che sarebbe in grado di soddisfare la crescente domanda di accessi ad alta velocità da parte dei cittadini degli stati europei. Tuttavia, il roll-out della rete FTTH comporta costi notevoli sia per la posa delle fibre ottiche che per gli apparati necessari limitando gli investimenti da parte degli operatori. Pertanto, le recenti tecnologie ibride fibra-rame rappresentano una valida alternativa sia dal punto di vista tecnico che economico, sfruttando l'attuale accesso in rame per la rete secondaria, di lunghezza tipica di circa 300 m, combinato con un approccio Fibre To The Cabinet (FTTC) nella rete primaria e riuscendo a soddisfare le richieste di banda larga da parte degli utenti. Un esempio di tale tecnologia è rappresentato dalla tecnica del Vectoring applicata alla tecnologia di accesso VDSL2, che permette di raggiungere velocità di connessione fino a 100 Mbit/s su linee di lunghezza fino a 300 m, le cui reali prestazioni dipendono dalle condizioni dei cavi e dei singoli doppini. Nella prima parte di questo lavoro verranno presentati i risultati della caratterizzazione della degradazione dovuta all'interferenza sul lato lontano (Far End Cross Talk, FEXT) in architetture di rete di accesso Fibre To The Cabinet e Fibre To The Building (FTTB), condotta attraverso l'uso di un emulatore di cavo, ed in particolare l'impatto del Vectoring in uno scenario multi operatore. Nella seconda parte, invece, verranno comparate in un contesto multi operatore le tecnologie standard per le reti in rame, G.fast, VDSL2 e i loro avanzamenti, fornendo i dettagli riguardo ai modelli di attenuazione ed interferenza e mostrando i risultati delle simulazioni.

Abstract: The Digital Agenda for Europe, within the "Europe 2020" strategy, establishes the target of 100 Mbit/s Internet access that should be available for 50% of European household, to be achieved until 2020. Fibre to the Home (FTTH) is currently the best solution to meet this requirement that could be able to satisfy the increase of the high speed access usage among the European citizens. Nevertheless, the roll-out of the FTTH network brings high costs for the deployment of the optical fibres and the instruments that limit the investments from the operators. Therefore, the recent hybrid technologies that exploit the current copper-based access for the secondary network, with loop length of 300 m,

combined to the Fibre to the Cabinet (FTTC) approach for the primary network, represents a valid alternative from the technical and economical points of view, meeting the requirement of high bandwidth availability for the user. An example of such technologies is the Vectoring technique applied to the VDSL2 access, that allows for connection speeds up to 100 Mbps on loop length of 300 m, whose actual performance depends on the conditions of the cables and the individual pairs. The results of the characterization of the FEXT (Far End Cross Talk) penalties in FTTC and FTTB access networks achieved through a physical cable simulator and in particular, the impact of the use of the Vectoring technique in a multi operator scenario, will be shown in the first part of this work. In the last part, contrariwise, the G.fast and VDSL2 standard technologies and their enhancements will be compared in a multi operator scenario, giving the details concerning attenuation and interference models and showing the simulations' results.

1. Introduzione

La domanda di accessi ad Internet ad alta velocità è significativamente in aumento ogni anno, spinta verso l'alto da parte di servizi come il video-on-demand, il cloud computing e lo storage on-line. Per supportare al meglio questi servizi, le reti di accesso devono essere in grado di fornire agli utenti bit rate sempre più elevati. L'Agenda Digitale per l'Europa (DAE), promossa dalla Commissione Europea, pone come obiettivo che la popolazione UE sia connessa attraverso una rete di accesso a banda ultra larga. Entro la fine del 2020, infatti, la banda larga con velocità di accesso pari o superiore a 30 Mbit/s deve essere a disposizione di tutti i cittadini UE e il 50% delle famiglie deve essere in grado di sottoscrivere connessioni ad Internet a 100 Mbit/s [1]. Le soluzioni tecnologiche basate su fibra ottica fino a casa dell'utente sia con architettura Passive Optical Network (PON) che Point-to-Point (PtP) [2], e loro evoluzioni, sono considerate la soluzione a lungo termine per la domanda di banda larga. Tuttavia, l'investimento per realizzare l'infrastruttura FTTH è significativo, perciò le opzioni tecnologiche, come ad esempio Fibre To The Cabinet (FTTC) e Fibre To The Building (FTTB), devono essere considerate come passo intermedio verso l'FTTH, le quali sono in grado di garantire adeguate prestazioni per soddisfare gli obiettivi della strategia Europa 2020. Questo tipo di infrastrutture vengono comunemente raggruppate con la dicitura Fibre To The x (FTTx), dove la x rappresenta il punto, sempre più vicino all'utente, in cui termina la rete in fibra, mentre l'ultimo segmento di rete è costituito dai doppini in rame o da accessi radio (WiFi, 4G e in futuro 5G). Pertanto, le tecnologie xDSL, soprattutto il Very High Speed Digital Subscriber Line 2 (VDSL2) e il Fast Access to Subscriber Terminals (G.fast), svolgono un ruolo fondamentale per fornire agli utenti bit rate da 30 Mbit/s fino a 1 Gbit/s. In questo scenario, la tecnica Vectoring è fondamentale per migliorare le prestazioni delle attuali reti di accesso in rame. In particolare, la tecnica Vectoring

combinata alla tecnologia VDSL2 rappresenta un buon compromesso per aumentare la disponibilità di banda agli utenti.

Il punto chiave è il grado di penetrazione della fibra negli scenari FTTx che garantisce un accesso ultra broadband alla maggior parte della popolazione a costi di implementazione accettabili per gli operatori. Attualmente, la maggior parte dei piani a banda ultra larga hanno come obiettivo principale un veloce Return On Investment (ROI) e, di conseguenza, mirano alla massima capacità ottenibile sfruttando l'ultimo segmento di doppino [3]. D'altra parte, le soluzioni FTTH sono la scelta migliore in termini di prestazioni, ma richiedono spese significative di capitale (CAPEX) e molto tempo per la loro messa in campo. Soluzioni come FTTC e FTTB stanno guadagnando slancio grazie al loro compromesso prestazioni-vs-CAPEX. In questo lavoro, sono state valutate le tecnologie di rete di accesso per gli scenari FTTC e FTTdP, mettendo a confronto le prestazioni di ADSL2, VDSL2, EVDSL, e G.fast con e senza l'utilizzo del Vectoring. Anche se queste sono tutte tecnologie pronte per il mercato, la necessità di considerare gli scenari multi-operatore sta causando ritardi di implementazione. L'obiettivo di questo lavoro è quello di fornire una panoramica delle sfide di implementazione e di fornire alcune linee guida generali per quanto riguarda le prestazioni ottenibili.

2. Tecnologie per la rete di accesso

Le tecnologie xDSL (x Digital Subscriber Line) sono le più usate nelle reti di accesso basate su doppini in rame per fornire agli utenti connessioni ad Internet ad alta velocità, costituendo il cosiddetto "accesso a banda larga". Le tecnologie xDSL sono principalmente suddivise in tre famiglie in base alle loro caratteristiche di comunicazione: a) HDSL (High bit rate DSL) che fornisce connessioni simmetriche nei due sensi di comunicazione (sia downstream che upstream hanno lo stesso bit rate); b) ADSL/ADSL2+ (Asymmetric DSL) che fornisce una connettività asimmetrica (il bit rate in downstream è maggiore rispetto all'upstream); c) VDSL/VDSL2 (Very high speed DSL) che è in grado di fornire connettività sia simmetrica che asimmetrica. Per la connettività di utenti residenziali si prediligono le famiglie con bit rate asimmetrici.

La tecnologia ADSL [4] è progettata per gli utenti residenziali e permette la trasmissione simultanea di voce e dati su un singolo doppino attraverso l'utilizzo di uno splitter. La trasmissione è asimmetrica: la larghezza di banda dedicata al flusso di informazioni dalla rete al terminale utente (downstream) è significativamente superiore a quella riservata per la direzione inversa (upstream). Questa asimmetria rende ADSL ideale per la navigazione in Internet e per applicazioni come i servizi video. Infatti, in tali situazioni il traffico generato dall'utente è notevolmente inferiore a quello richiesto dal server. Il bit rate massimo raggiungibile è di circa 6 Mbit/s in downstream e di 640 kbit/s in upstream. È importante notare, però, che il bit rate varia in base allo stato della linea, in particolare a causa della lunghezza del doppino (attenuazione) e interferenze (diafonia). Per i doppini di lunghezza

elevata, l'attenuazione è il fattore principale che compromette la capacità ottenibile, mentre per doppini di lunghezza media e bassa, la diafonia tra coppie adiacenti è un fattore limitante per il miglioramento della capacità.

Le tecnologie ADSL2 e ADSL2+ sono dirette evoluzioni della precedente. L'ADSL2 [5] offre migliori prestazioni dell'ADSL in termini di velocità di connessione e lunghezza della linea. Per questa tecnologia il massimo bit rate ottenibile è di 12 Mbit/s per il downstream e di 1 Mbit/s per l'upstream, pur mantenendo la stessa allocazione spettrale dell'ADSL, grazie ad una migliore efficienza di modulazione e altri arrangiamenti. L'ADSL2+ [6], oltre ai miglioramenti introdotti dall'ADSL2, estende l'allocazione spettrale fino a 2.2 MHz, portando il massimo bit rate ottenibile a 24 Mbit/s in downstream.

La tecnologia VDSL [7] migliora notevolmente l'allocazione spettrale rispetto alle tecnologie precedenti e sfrutta lo spettro fino a 12 MHz. In questo modo, sempre sfruttando l'infrastruttura esistente di doppini in rame originariamente impiegati per i servizi voce, riesce a supportare bit rate fino a 50 Mbit/s in downstream e 6,5 Mbit/s in upstream in caso di servizi asimmetrici e fino a 25 Mbit/s in entrambe le direzioni in caso di servizi simmetrici. Questa tecnologia può essere impiegata sia con DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) collocati in centrale che con DSLAM collocati in cabinet stradali alimentati in fibra e supporta lunghezze di doppino che vanno da 300 fino a 1500 m.

La tecnologia VDSL2 [8] è comunemente usata nelle reti di accesso in rame ed è in grado di raggiungere velocità di trasferimento dati molto elevate. Il VDSL2 è stato sviluppato a partire dal precedente VDSL con l'obiettivo di essere pienamente compatibile con l'esistente ADSL2+ e di offrire bit rate significativamente alti. Il VDSL2 sfrutta lo spettro fino a 30 MHz, differenziando diversi profili in base alla porzione di spettro utilizzata. Attualmente, i due profili maggiormente usati sono il 17a e il 30a, che sfruttano lo spettro fino a 17 MHz e 30 MHz rispettivamente. Questa tecnologia supporta un minimo bit rate bidirezionale, inteso come la somma dei bit rate in downstream e in upstream, di 100 Mbit/s per il profilo 17a e di 200 Mbit/s per il profilo 30a per lunghezze di doppino fino a circa 300 m.

La tecnologia Enhanced VDSL (EVDSL) è un'evoluzione del VDSL2 e consiste in un'estensione dello spettro utilizzato fino a 35 MHz. Pur essendo conosciuto attualmente con una nuova denominazione è annoverato tra le varianti del VDSL2. L'EVDSL è stato recentemente standardizzato dall'ITU-T con l'Amendment 1 ed inglobato nella nuova versione della Raccomandazione G.993.2 [8] con l'Annex Q. Questa versione del VDSL2 introduce il nuovo profilo 35b e i corrispondenti bandplan, estendendo lo spettro in downstream fino a 35,328 MHz. Questa estensione è ottenuta incrementando il numero di toni, mantenendone però invariata l'allocazione la spaziatura come per il profilo 17a. In questo modo si è superata l'anomalia del profilo 30a che prevedeva allocazione, spaziatura e banda dei toni diverse rispetto ai profili inferiori. Questo nuovo profilo è in grado di supportare un minimo bit rate bidirezionale netto di 400 Mbit/s su doppini di breve lunghezza, ma come per gli altri profili subisce una forte degradazione delle prestazioni dovuta all'attenuazione e alla diafonia delle coppie vicine.

La tecnologia G.fast [9] [10] è una nuova tecnologia che può fornire bit rate fino a 1 Gbit/s su reti di accesso in rame per lunghezze di doppino di circa 100 m. Il G.fast usa lo spettro di frequenze fino a 106 MHz e 212 MHz, con la conseguente definizione di due profili diversi. L'uso di una banda di frequenze più elevata permette di ottenere elevate velocità di trasmissione dati per brevi distanze, da 500 Mbit/s per distanze di 100-200 m, fino a 1 Gbit/s per distanze minori di 100 m. Inoltre, a differenza dei sistemi xDSL, dove le sottoportanti (o toni) possono essere solo unidirezionali suddivise tra downstream e upstream con la tecnica Frequency Division Duplexing (FDD), nel G.fast possono essere dedicati sia al downstream che all'upstream grazie alla tecnica Time Division Duplexing (TDD). In questo modo, se necessario, tutti i toni possono essere utilizzati per il downstream, e viceversa. Come nel caso dei sistemi xDSL, il G.fast può essere affetto da diafonia da coppie adiacenti nello stesso cavo, con un conseguente degradamento delle prestazioni.

La tecnologia XG-Fast [11], che è l'evoluzione del G.fast presentata da Alcatel-Lucent (ora Nokia), sarà in grado di offrire bit rate ancora più alti per lunghezze di doppino molto brevi, tipicamente minori di 100 m. In accordo agli esperimenti preliminari condotti attraverso l'uso di una gamma di frequenza ancora più ampia (fino a 500 MHz) e tecniche come il bonding e il phantom mode, l'XG-Fast raggiungerebbe velocità fino a 10 Gbit/s (bit rate aggregato) per doppini di breve lunghezza (minori di 50 m).

3. La tecnica del Vectoring

Il principale svantaggio delle tecnologie xDSL e G.fast è la forte limitazione delle prestazioni a causa dell'attenuazione e della diafonia che interessano le varie coppie contenute nello stesso cavo (binder). I segnali (downstream e upstream), infatti, provocano due tipi di interferenza: FEXT (Far End Crosstalk) e NEXT (Near End Crosstalk). La prima è l'interferenza causata dai segnali che si propagano nella stessa direzione su coppie diverse, mentre la seconda è dovuta ai segnali che si propagano nella direzione opposta (Figura 1).

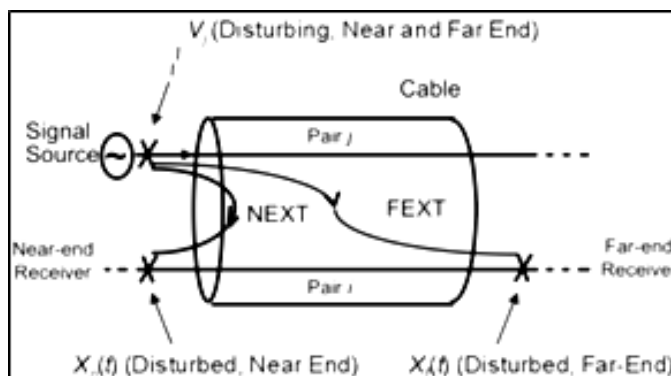


Figura 1. Schema della diafonia (NEXT e FEXT) nei cavi di accesso [12]

Nei sistemi xDSL, l'eliminazione della NEXT è ottenuta sia usando la tecnica FDD, per ADSL e VDSL, che la tecnica TDD, nel G.fast. Per quanto riguarda la FEXT, invece, il segnale e l'interferenza sono sulle stesse frequenze e non è possibile eliminarla in modo semplice. Inoltre, nei sistemi VDSL2, a causa delle lunghezze di cavo in gioco e le frequenze utilizzate vi è sia una significativa attenuazione che una FEXT non trascurabile, con una conseguente limitazione delle prestazioni ottenibili con tale tecnologia.

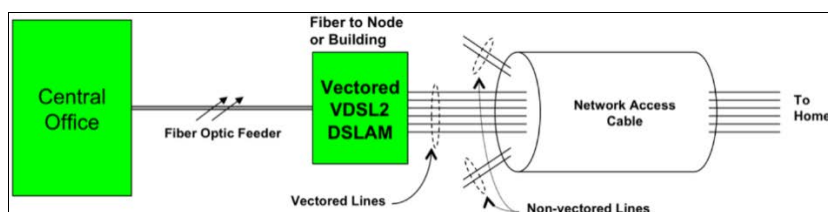
Per eliminare il contributo della FEXT si può far uso della tecnica Vectoring [13] che è una tecnica di trasmissione applicabile ai sistemi xDSL e G.fast, in modo da migliorare le prestazioni mediante la cancellazione della diafonia. La cancellazione della FEXT è ottenuta attraverso un meccanismo di "pre-compensazione" dei segnali generati su ogni linea nello stesso cavo. Questo processo comporta una complessità computazionale in quanto richiede la stima di tutti i contributi di diafonia tra le linee e deve essere eseguita in tempo reale sui segnali trasmessi e ricevuti da un numero potenzialmente elevato di linee. Il miglioramento è ottenuto attraverso la conoscenza e il coordinamento dei segnali di tutte le coppie in un cavo in modo da ottenere la cancellazione della diafonia. Se da un lato ci sono indubbi vantaggi che possono essere ottenuti con l'utilizzo del vectoring, dall'altro lato lo svantaggio principale è che il vectoring raggiunge prestazioni ottimali solo se vi è il pieno controllo di tutte le linee dello stesso cavo (Full Vectoring). Una linea su cui il vectoring non è implementato (linea aliena) genera diafonia che non può essere eliminata e, conseguentemente, porta ad una riduzione delle prestazioni che non può essere prevista in anticipo e aumenta all'aumentare del numero di linee aliene. In uno scenario multi-operatore, in cui ogni operatore controlla un sottoinsieme delle linee in un binder (gruppo vettorizzato), per ottenere tutti i vantaggi del vectoring è necessario un coordinamento tra i DSLAM dei vari operatori. Allo stato attuale non esiste uno standard per il vectoring multi-operatore, ma una iniziativa in questa direzione potrebbe essere stimolata sia dal mercato che dall'intervento di un organismo di regolamentazione.

4. Prestazioni VDSL2 Vectoring

In questo paragrafo, saranno valutate le prestazioni della tecnica vectoring applicata alla tecnologia VDSL2 in uno scenario di rete reale, riprodotta in laboratorio mediante l'uso di DSLAM e Customer Premises Equipment (CPE) comunemente utilizzati in campo e di un simulatore di cavo e diafonia. Con l'uso di queste apparecchiature si è potuto testare vari scenari reali e valutare il miglioramento delle prestazioni ottenuto mediante l'uso del vectoring in quelli di principale interesse pratico. Infine, è stato studiato l'impatto del processing aggiuntivo dovuto al vectoring sul consumo energetico complessivo [14].

Setup sperimentale

Il sistema sperimentale è stato realizzato utilizzando apparecchiature comunemente impiegate dagli operatori di rete secondo lo schema di principio mostrato in Figura 2. Il DSLAM, capace di implementare la tecnica vectoring, è rappresentato dalla scheda NDLT-C installata in un OLT 7330 ISAM FTTN di Alcatel-Lucent. Questa scheda supporta fino a 48 linee e implementa il Board Level Vectoring (vectoring solo sulle linee della scheda) sulla tecnologia VDSL2 fino al profilo 17a (17 MHz). Il CPE è il Technicolor TG588v ed è anche comunemente usato in campo. Supporta entrambe le tecnologie ADSL e VDSL2 fino a profilo 17a con pieno supporto del vectoring. Infine, lo Sparnex Concept 50 è stato utilizzato per la simulazione del cavo ed è conforme alla norma tecnica TR-249 [14]. Esso permette di simulare un cavo con 50 coppie di lunghezza variabile, simula la diafonia che si avrebbe in un cavo reale e permette di iniettare un rumore di fondo all'interno della singola linea.



Per impostare le corrette condizioni operative delle prove, le linee sono state configurate con i parametri mostrati nella Tabella 1. Per tutte le prove, è stato iniettato in ciascuna linea un rumore di fondo -130 dBm/Hz tramite il simulatore di cavo.

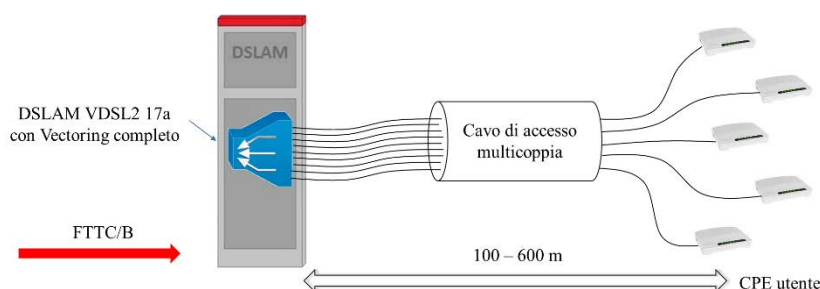
Figura 2. Architettura di riferimento per gli scenari FTTx [12]

Tabella 1. Parametri principali dei profili di spettro utilizzati per le diverse tecnologie di accesso

Operational Mode	VDSL2 12a	VDSL2 17a	ADSL2+
Band Plan	Annex B998	Annex B998e17	Annex A
Optional Band Usage (25-138 kHz)	Upstream	Upstream	-
ADSL Band Usage	Allowed	Allowed/Not allowed/ADSL2+ not allowed	-
Upstream Power Back Off	OFF	OFF	OFF
Noise Margin - Target	6 dB	6 dB	6 dB
Maximum for Aggregate Power	25,5 dBm	14,5 dBm	25,5 dBm

Scenario VDSL2 17a full vectoring

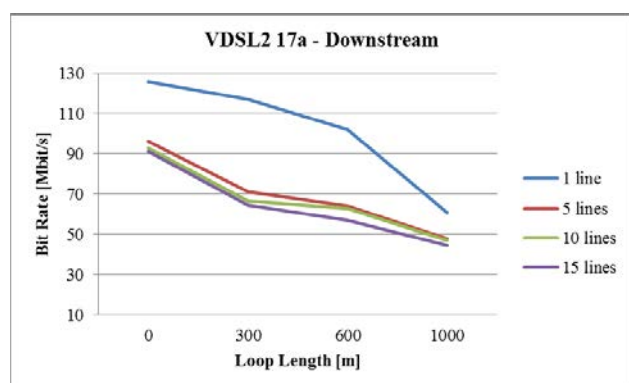
Il primo caso analizzato è quello in cui tutte le linee attive all'interno del cavo sono alimentate da segnali VDSL2 e fanno parte del gruppo vettorizzato. Utilizzando il simulatore di cavo, è stato possibile realizzare un cavo multicoppia con numero di linee e lunghezza crescenti; in Figura 3 è mostrata l'architettura di riferimento. Per la valutazione delle prestazioni, durante la fase di test si è collezionato il valore del massimo bit rate ottenibile su ogni linea, mostrato dal sistema di gestione del DSLAM. Quando il vectoring non è applicato, le prestazioni degradano all'aumentare della distanza dal DSLAM e all'aumentare del numero di linee interferenti [15]. Inoltre, quando il numero di interferenti aumenta, si registra un aumento della variazione del bit rate tra le linee. Invece, quando il vectoring è applicato a tutte le linee attive all'interno del cavo, si osserva un notevole miglioramento delle prestazioni, raggiungendo il rendimento ideale di singola linea (assenza di diafonia), e di conseguenza si osserva una riduzione significativa della variazione del bit rate tra le linee.



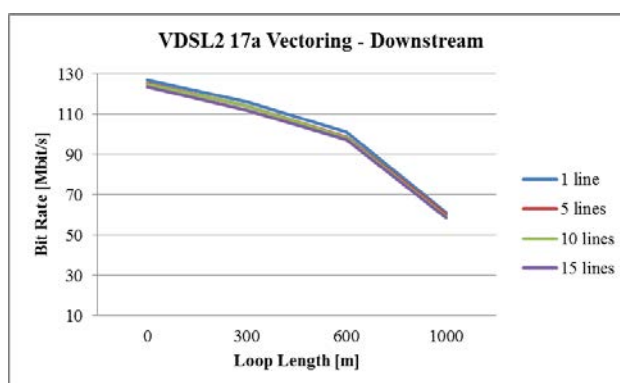
In Figura 4 si può vedere che per distanze tipiche degli scenari FTTB e FTTC (circa 100 e 600 m rispettivamente), il miglioramento delle prestazioni dovuto al vectoring si attesta intorno al 40%. Inoltre, la variazione delle prestazioni tra le linee dal 40% circa in assenza di vectoring scende a circa il 10% in presenza di vectoring. Per l'upstream si ottengono risultati simili.

Figura 3. Architettura di riferimento per lo scenario Full Vectoring

Figura 4. Prestazioni del VDSL2 17a senza Vectoring (a) e con Vectoring (b)



a)



b)

Scenario VDSL2 17a Vectoring da Cabinet e ADSL2+ da Centrale

Il caso precedente in cui tutte le linee di un cavo sono alimentate solo da segnali VDSL2 non è uno scenario pienamente realistico. Infatti, la tecnologia ADSL è ancora molto diffusa, soprattutto nella versione ADSL2+, per cui si è investigata la coesistenza dell'ADSL2+ con il VDSL2 Vectoring. In questo scenario, si presume che il cavo è costituito da due gruppi di linee: a) il primo gruppo con linee provenienti da Centrale (circa 1000 m) alimentato con segnali ADSL2+; b) il secondo gruppo con linee provenienti dal cabinet alimentato con segnali VDSL2 17a Vectoring, come mostrato in Figura 5. Inoltre, si è considerato l'effetto di sovrapposizione spettrale tra le due tecnologie, escludendo selettivamente dal VDSL2 la porzione di spettro utilizzata dall'ADSL.

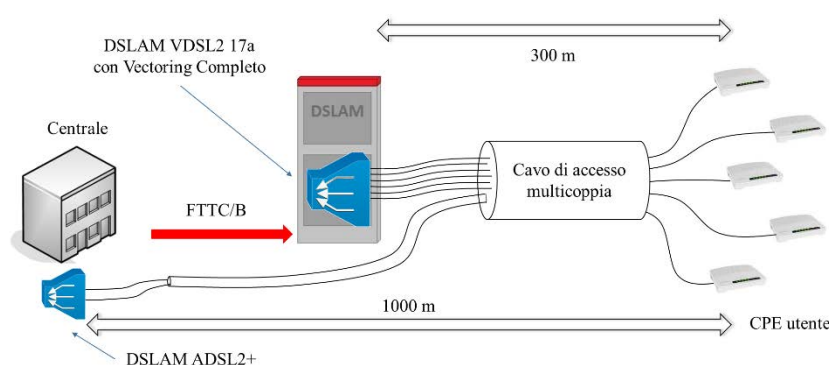
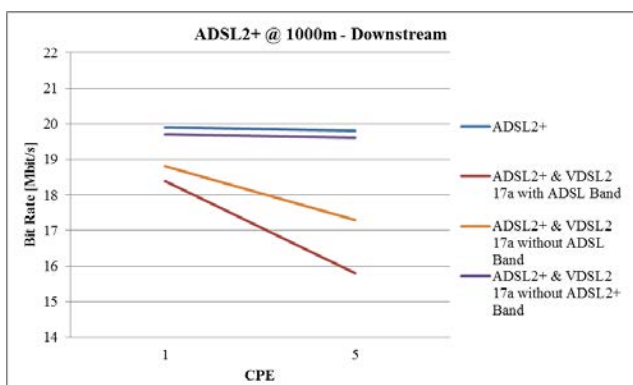


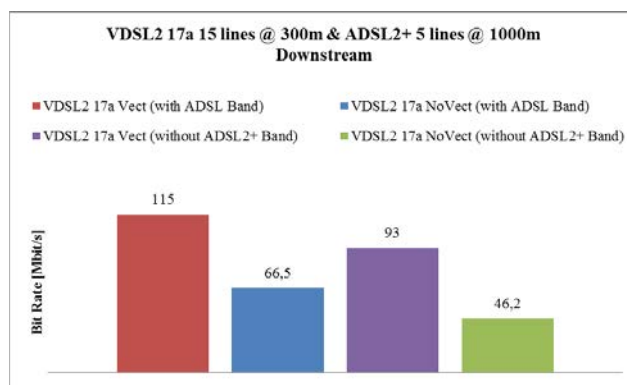
Figura 5. Architettura di riferimento per lo scenario VDSL2 17a Vectoring da Cabinet con ADSL2+ da Centrale

Figura 6. Prestazioni dell'ADSL2+ con diversi profili di spettro del VDSL2 17a (a) e dei diversi profili di spettro VDSL2 17a con ADSL2+ (b)

I risultati ottenuti mostrano che in presenza di VDSL2 (utilizzando l'intero spettro) le prestazioni dell'ADSL2+ degradano di circa il 20% (Figura 6a), mentre per il VDSL2 non ci sono variazioni sostanziali legate alla presenza dell'ADSL2+. Invece, le prestazioni del VDSL2 dipendono dalla porzione di spettro utilizzata, cioè se si sfrutta tutto lo spettro o se viene esclusa la banda ADSL2+ (2,2 MHz), come mostrato in Figura 6b. I risultati non cambiano se si variano le percentuali di utilizzo delle due tecnologie.



a)



b)

Scenario VDSL2 17a Vectoring da Cabinet con ADSL2+ e VDSL2 12a da Centrale

Un ulteriore scenario che è stato valutato è quello che prevede la coesistenza di diverse versioni della stessa tecnologia di accesso. In una condizione di progressiva adozione di nuove tecnologie non può essere esclusa la presenza simultanea del VDSL2 con entrambi i profili 12a e 17a, con DSLAM collocati in posizioni diverse. Pertanto, si è considerato il caso di un cavo che, oltre alle linee del caso precedente, include un altro gruppo di linee proveniente da centrale alimentate con segnali VDSL2 12a (Figura 7). Poiché la lunghezza delle linee è impostata dal simulatore di cavo e come riferimento può essere considerato il punto in cui è collocato il CPE, le linee possono essere collegate allo stesso DSLAM, consentendo l'utilizzo del vectoring per entrambi i profili.

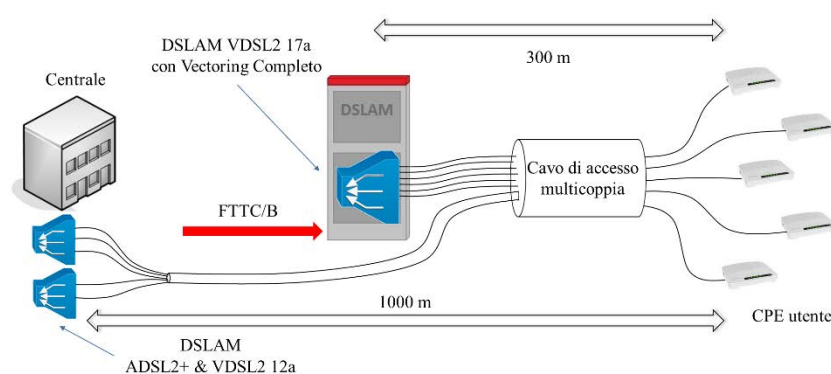
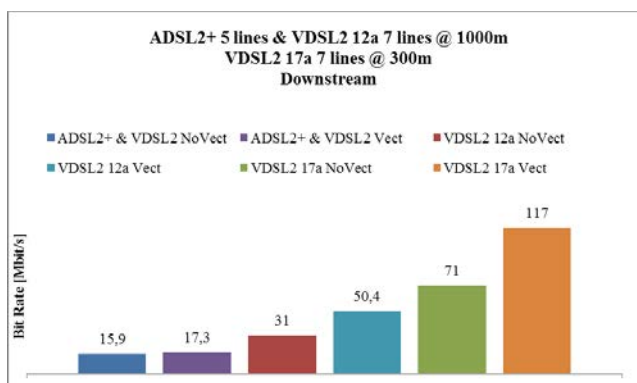


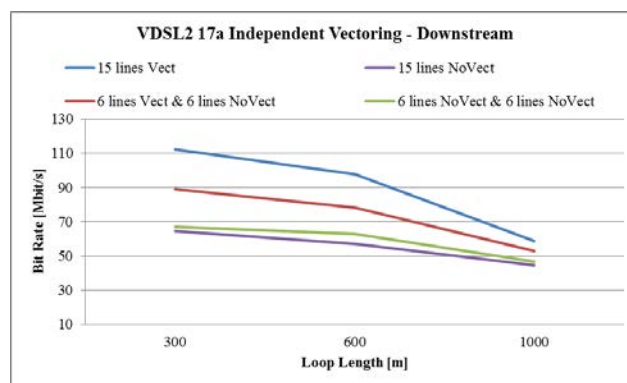
Figura 7. Architettura di riferimento per lo scenario VDSL2 17a Vectoring da Cabinet con ADSL2+ e VDSL2 12a da Centrale

Figura 8. Prestazioni del VDSL2 17a con ADSL2+ e VDSL2 12a in uno scenario di Vectoring Completo (a) e del VDSL2 in uno scenario di Vectoring Indipendente (b)

Come si può vedere dalla Figura 8a, le prestazioni del VDSL2 17a Vectoring, su distanze di circa 300 m e in coesistenza con il profilo 12a, non subiscono un degrado apprezzabile in configurazione di vectoring completo. Risultati simili si ottengono se le linee alimentate con segnali VDSL2 12a provengono dal cabinet come per il profilo 17a.



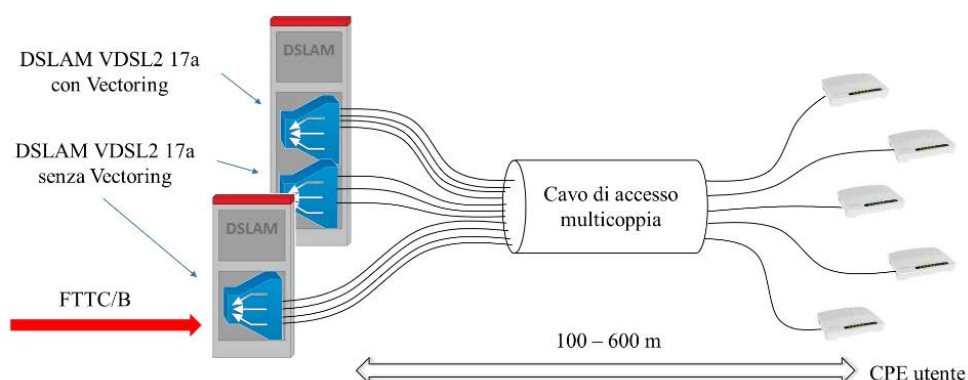
a)



b)

Scenario VDSL2 17a Vectoring con linee aliene

Infine, è stato analizzato il comportamento del VDSL2 17a quando nel cavo è presente un altro gruppo di linee proveniente da un altro cabinet ma con lo stesso profilo. A differenza di quanto visto sopra, questo scenario permette di valutare il caso di vectoring applicato indipendentemente da differenti operatori ai propri gruppi di linee nel cavo; infatti un gruppo di linee, sia vettorizzate che non vettorizzate, può essere considerato alieno rispetto ad un altro gruppo vettorizzato e viceversa. Il set-up è stato realizzato creando un cavo con due gruppi di linee di lunghezza simile e profili uguali, collegato su due DSLAM diversi, con uno solo in grado di implementare il vectoring, come mostrato in Figura 9.



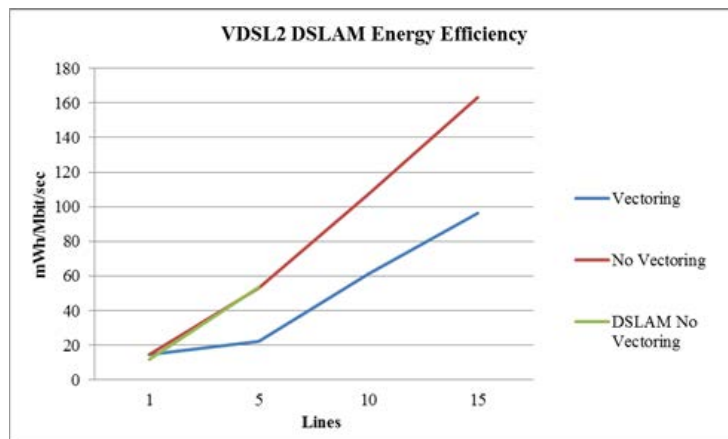
In base ai risultati mostrati in Figura 8b, le prestazioni dei due gruppi di linee sono comprese in un intervallo che ha come limite superiore le prestazioni dello scenario con vectoring completo e come limite inferiore le prestazioni dello scenario senza vectoring. Nel caso di equa distribuzione delle linee tra i due gruppi, le prestazioni del VDSL2 17a Vectoring si collocano circa al centro dell'intervallo appena definito, mantenendo ancora un miglioramento delle prestazioni di circa il 25% rispetto al caso senza vectoring. In questo scenario le prestazioni variano in base al numero di gruppi vettorizzati e alla ripartizione delle linee tra i gruppi, più la numerosità di un gruppo predomina sugli altri meno risente della diafonia delle linee aliene.

Efficienza energetica

Il consumo di energia relativo all'impiego in massa è una questione chiave delle tecnologie di rete di accesso da cui può dipendere un significativo impatto energetico. Per questo motivo, si è misurato il consumo energetico degli apparati di rete in condizioni di esercizio al fine di valutare l'efficienza energetica delle diverse tecnologie finora menzionate. La Figura 10 mostra il confronto del consumo energetico dei due DSLAM in funzione del numero di linee attive. Dai dati raccolti relativi al consumo energetico si è osservato che l'elaborazione aggiuntiva relativa al vectoring ha un basso impatto sull'assorbimento medio di energia. Pertanto, si ottiene una notevole riduzione del consumo medio

Figura 9. Architettura di riferimento per lo scenario VDSL2 17a Vectoring con linee aliene

espresso in MWh/Mbit/s poiché il consumo energetico di un DSLAM vectoring è uguale a quello di un DSLAM non vectoring e le prestazioni in termini di bit rate aumentato utilizzando il vectoring, portando ad un aumento dell'efficienza energetica.



5. Prestazioni EVDSL e G.fast

In questo paragrafo saranno analizzate le prestazioni in downstream delle nuove tecnologie di rete di accesso in rame, EVDSL e G.fast, in relazione a quelle dell'ADSL2+ e del VDSL2 in uno scenario multi operatore con diversi schemi di Vectoring, sfruttando un ambiente simulativo [17]. Infatti, per valutare le prestazioni delle tecnologie di accesso in diverse architetture, è stato implementato un simulatore Monte Carlo in grado di predire il bit rate in downstream ottenibile in base al tipo di cavo, tecnologia xDSL, lunghezza della linea e numero e tipo di utenti presenti in un singolo cavo. Il simulatore genera molte migliaia di matrici di crosstalk casuali e poi risolve numericamente le equazioni presentate più avanti al fine di calcolare la capacità risultante. Gli intervalli di confidenza al 95% risultanti sono molto piccoli, meno dell'1%. Per il G.fast sono stati considerati due scenari: G.fast con banda da 2.2 MHz a 106 MHz e G.fast con banda da 35 MHz a 106 MHz. Il primo scenario (denominato G.Fast#1) viene utilizzato quando nella rete di accesso sono presenti sia utenti ADSL2+ (da Centrale) che utenti G.fast. Il secondo scenario (denominato G.fast#2) è utilizzato quando lo spettro fino a 35 MHz è riservato agli utenti EVDSL da cabinet. A differenza delle soluzioni xDSL, il G.fast consente agli operatori di suddividere a loro scelta la banda tra downstream e upstream. Per confrontare le prestazioni del G.fast con quelle dell'xDSL, si è scelto di dedicare tre quarti della larghezza di banda totale (banda aggregata) al downstream.

Modelli di interferenza e attenuazione

L'ambiente simulativo è stato definito a partire dai modelli di attenuazione e interferenza presentati di seguito con le relative

Figura 10. Efficienza energetica di un DSLAM VDSL2 Vectoring comparata con un DSLAM VDSL2 non Vectoring

assunzioni. Pertanto, gli scenari studiati considerano N utenti serviti da un DSLAM diverso per ogni operatore. Inoltre, i DSLAM possono trovarsi nello stesso cabinet o in cabinet separati nello stesso sito e gli utenti sono considerati essere distribuiti casualmente nel cavo.

L'attenuazione è stata valutata in accordo alla legge di dipendenza dell'attenuazione dalla frequenza riportata in [16]. I parametri per il modello di cavo "C.T. 1240 0,4 mm", con una attenuazione 24 dB/km a 1 MHz, fanno riferimento al modello ATIS [17], che è il cavo più utilizzato nella rete di accesso in rame italiana. Pertanto, l'attenuazione risultante (in dB) è:

$$Attn(f) = (0,097 + 0.72\sqrt{f} + 0.165f) 24 d \quad (1)$$

dove f è la frequenza in MHz e d la lunghezza del cavo in km.

La FEXT è stata valutata facendo riferimento sempre al modello ATIS [17], che è ampiamente usato per modellare i cavi con 4 sottogruppi di 25 coppie ciascuno. ATIS comprende due modelli di interferenza: il modello 99%, che fornisce una stima della diafonia presente sul 99° peggior doppino, e il modello Beta, che fornisce una distribuzione di probabilità della diafonia presente su una coppia generica. Secondo il modello 99%, la diafonia (in dB) è pari a:

$$FEXT_{99}(f) = -45 + 20\log_{10}f + 10\log_{10}l - Attn(f) \quad (2)$$

dove la frequenza f viene misurata in MHz e la lunghezza di accoppiamento l è misurata in km. La FEXT ottenuta è una stima della FEXT risultante tra le coppie dello stesso cavo nell'1% dei casi peggiori. Nel modello Beta, invece, la FEXT è modellata come una variabile casuale:

$$FEXT_B(f) = FEXT_{99}(f) - 60 - 50X \quad (3)$$

dove X è distribuita secondo una legge Beta con parametri $\alpha = 11$ e $\beta = 6.6$.

Nel caso di vicini interferenti multipli, distribuiti in modo casuale su più cavi, sono state valutate numericamente tramite simulazioni con il Monte Carlo le seguenti equazioni, che estendono il modello di FEXT ATIS. Pertanto, il modello 99% diventa:

$$FEXT_{99}(f, n) = FEXT_{99}(f) - 4 + 6\log_{10}n \quad (4)$$

dove n è il numero di vicini. Inoltre, si fornisce un modello di interferenza mediana:

$$FEXT_{50}(f, n) = FEXT_{99}(f) - 15 + 10\log_{10}n \quad (5)$$

Il rapporto segnale rumore, SNR, ad ogni tono è calcolato come rapporto tra la potenza ricevuta e la somma della FEXT e il rumore termico

nella banda del tono, che è $N_0 = -140$ dBm/Hz. Il bitloading, invece, è calcolato in base allo standard ANSI. Pertanto, la capacità del tono è:

$$C = B \log_2(1 + \gamma SNR) \quad (6)$$

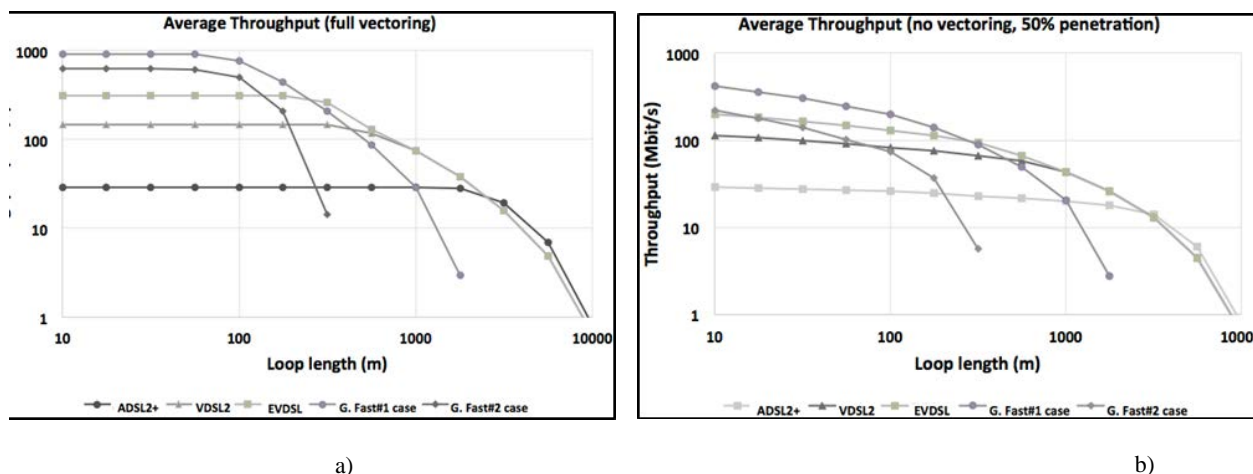
dove B è la banda del singolo tono, e $\gamma = -12,75$ dB è ottenuto come la somma del gap SNR, il guadagno di codifica e il margine di rumore. Va notato che il bitload massimo per il tono VDSL2 è di 15 bit, che si ottiene con un SNR di circa 50 dB. Nel seguito saranno considerati il profilo VDSL2 17a con il piano di frequenze B8-8 e il profilo EVDSL 35b con il piano di frequenze B8-19.

Scenario con Vectoring Completo

La Figura 11a mostra il throughput medio come funzione della distanza DSLAM-CPE (lunghezza della linea) in uno scenario senza interferenza, ad esempio Vectoring completo. Ciò può verificarsi nei seguenti casi: a) singolo operatore presente nel cabinet. L'unico operatore gestisce tutte le linee del Cabinet con un singolo dispositivo che è in grado di eliminare qualsiasi interferenza; b) più operatori con il modello MOV (MultiOperator Vectoring). In questo scenario, ogni operatore fornisce il proprio DSLAM e la cancellazione coordinata della diafonia è realizzata per mezzo di un protocollo distribuito.

Come si può vedere in Figura 11a, nell'intervallo di lunghezze tipiche di scenari FTTC (da 100 m a 1 km), la tecnologia EVDSL ha le migliori prestazioni. Per lunghezze di linea maggiori di 1 km, il vantaggio dell'EVDSL rispetto al VDSL2 è trascurabile, mentre per lunghezze minori di 200 m l'EVDSL fornisce più del doppio del bit rate del VDSL2. Inoltre, per lunghezze di linea inferiori a 200 m, il G.fast è in grado di fornire bit rate aggregati fino a 1 Gbit/s nello scenario G.fast#1. Nello scenario G.fast#2, invece, le prestazioni del G.fast degradano in modo significativo fino a diventare poco interessanti nella regione FTTC.

Negli scenari FTTdP e FTTB (inferiore a 100 m), tutte le tecnologie di accesso raggiungono la loro massima velocità: il G.fast, con lo scenario G.fast#1, si colloca a circa 1 Gbit/s, risultando come attraente alternativa all'FTTH. Invece, se il G.fast è limitata inferiormente a 35 Mhz, scenario G.fast#2, per garantire la coesistenza con l'EVDSL, la sua capacità si attesta intorno ai 600 Mbit/s, mentre l'EVDSL raggiunge i 300 Mbit/s.



Scenario in assenza di Vectoring

Nonostante il Vectoring sia una tecnologia relativamente matura, la sua implementazione nelle reti di accesso comporta un aumento di costo per utente e, soprattutto, richiede il coordinamento e l'inter-gestione dei DSLAM di proprietà di diversi operatori di rete di accesso (MOV).

In assenza di Vectoring, le prestazioni delle tecnologie xDSL sono inferiori, dipendono dal numero di linee attive (penetrazione) e hanno un'elevata varianza da linea a linea. In Figura 11b è mostrato il throughput medio in relazione alla lunghezza della linea, assumendo che tutte le linee abbiano la stessa lunghezza e la stessa tecnologia di accesso. La penetrazione si presume essere del 50%, vale a dire 50 linee su 100 hanno un abbonamento a banda larga. Le prestazioni dell'ADSL2+ sono influenzate solo marginalmente dall'interferenza grazie all'uso di frequenze più basse, quindi meno soggette a interferenze, giustificando il limitato interesse degli operatori per il vectoring con l'ADSL2+. I sistemi VDSL2 subiscono una riduzione del bit rate rispetto al caso con vectoring completo, che porta la velocità media al di sotto della soglia dei 100 Mbit/s, rendendo questa tecnologia inadeguata a soddisfare pienamente gli obiettivi della DAE. Le prestazioni dell'EVDSL, invece, sono molto più elevate, mantenendo una velocità media superiore ai 100 Mbit/s per lunghezze di linea di 300 m. Il G.fast, infine, è penalizzato in modo significativo dalla mancanza di cancellazione della diafonia, rendendolo inutilizzabile alle frequenze più alte. Nello caso G.fast#1, il G.fast ha prestazioni migliori rispetto all'EVDSL per lunghezze di linea fino a 200 m, mentre l'EVDSL ha le migliori prestazioni oltre i 200 m.

Figura 11. Prestazioni delle tecnologie di accesso per gli scenari con Vectoring Completo (a) e in assenza di Vectoring (b)

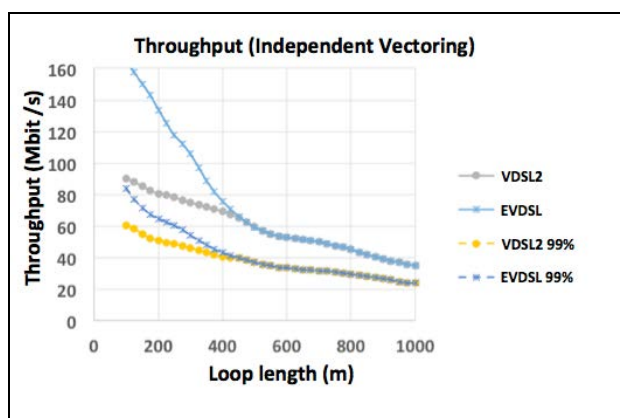
Se da un lato in assenza di Vectoring non è possibile fornire connessioni a 100 Mbit/s per tutti gli utenti con architettura FTTC, dall'altro lato implementare il vectoring completo in uno scenario multioperatore richiede sforzi sia per gli aspetti normativi che tecnici.

Scenario con Vectoring Indipendente

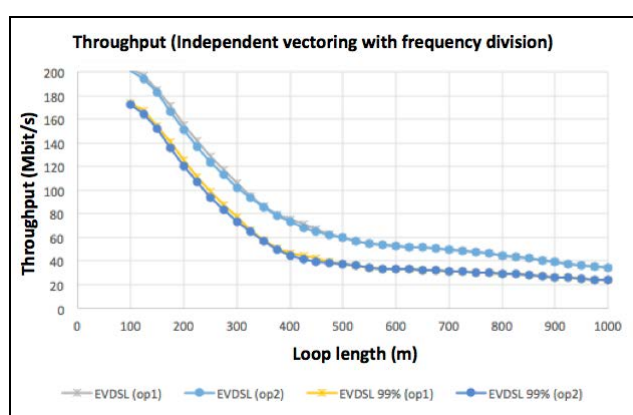
Nello scenario con Vectoring indipendente, ogni operatore implementa il vectoring sulle proprie linee, considerando le altre linee

come interferenti alieni. Il vantaggio di questa soluzione è che non è necessaria la coordinazione tra operatori differenti, mentre lo svantaggio risiede nel fatto che con questa soluzione non si ottengono tutti i vantaggi del vectoring. Di conseguenza, il vantaggio rispetto allo scenario in assenza di vectoring cambia significativamente da utente a utente. Inoltre, il risultato dipende dal numero di operatori e dalle quote di mercato di ciascun operatore, con l'operatore con più utenti che ottiene il guadagno prestazionale maggiore.

In Figura 12a è mostrato il throughput per utente ottenuto dalle simulazioni in funzione della lunghezza della linea per le tecnologie VDSL2 e EVDSL, considerando una penetrazione del 60%. Il grafico mostra sia i risultati per l'interferenza mediana che per l'interferenza del 99%. Per le linee di circa 200 m, il vectoring indipendente è in grado di fornire un throughput medio per utente maggiore di 80 Mbit/s per il VDSL2 e 130 Mbit/s per l'EVDSL. Pertanto, il vectoring indipendente non è in grado di fare in modo che il VDSL2 raggiunga l'obiettivo di 100 Mbit/s. Per quanto riguarda l'EVDSL, il vectoring indipendente incrementa le sue prestazioni solo per lunghezze di linea fino a 300 m, in cui l'EVDSL era già previsto che raggiungesse l'obiettivo di 100 Mbit/s. Il caso peggiore è ottenuto con il modello 99%, il quale mostra che né il VDSL2 né l'EVDSL sono in grado di raggiungere l'obiettivo delle prestazioni; inoltre, il guadagno dell'EVDSL rispetto al VDSL2 diventa molto piccolo. Per questi motivi, nello scenario con vectoring indipendente solo l'EVDSL potrebbe fornire connessioni a 100 Mbit/s in reti FTTC in cui la lunghezza delle linee è minore di 300 m.



a)



b)

Scenario con Vectoring Indipendente con divisione di frequenza

Lo scenario con vectoring indipendente con divisione di frequenza funziona esattamente come il caso di Vectoring indipendente per le frequenze del VDSL2. Invece, la gamma di frequenza estesa dell'EVDSL, da 17 MHz a 35 MHz, è suddivisa in più bande di frequenza e ciascuna di esse è assegnata ad un operatore diverso ad uso esclusivo. All'interno di ciascuna di queste bande, ogni operatore può ottenere i vantaggi del vectoring completo. Questa soluzione è stata proposta

Figura 12. Prestazioni del Vectoring Indipendente (a) e Vectoring Indipendente con divisione di frequenza (b). Simulazioni con 60% di penetrazione e due operatori

indipendentemente da due gruppi di ricerca [18] e [19]. Tuttavia, da quello che risulta agli autori, non vi è alcuna proposta su come assegnare le bande di frequenza ai vari operatori, il che ha un impatto sull'equità, perché le bande di frequenza inferiori hanno una capacità più elevata. In questo lavoro si propone lo schema Bidirectional Round Robin (BRR), che assegna ogni banda a sua volta ad un operatore diverso. Quando tutti gli operatori sono serviti, le bande rimanenti vengono nuovamente assegnate agli operatori in ordine inverso e così via. Il vantaggio di questa soluzione sta nel fatto che è richiesto un coordinamento minimo tra operatori differenti. Analogamente allo scenario con vectoring indipendente, lo svantaggio è che questa soluzione non può raggiungere tutti i vantaggi del vectoring. In aggiunta, questo schema limita la capacità disponibile anche in caso di bassa penetrazione. Inoltre, le prestazioni dipendono fortemente dal numero di operatori.

In Figura 12b è mostrato il throughput per utente ottenuto dalle simulazioni in funzione della lunghezza della linea per la tecnologia EVDSL, con una penetrazione 60%. Il grafico riporta i risultati sia per entrambi gli operatori (op1 e op2) che per l'utilizzo sia del modello di interferenza mediana che del modello di interferenza 99%. Le curve per i diversi operatori si sovrappongono, mostrando che lo schema BRR è equo. Per le linee di circa 200 m, il vectoring indipendente con divisione di frequenza è in grado di fornire un throughput medio per utente di circa 150 Mbit/s, che è leggermente migliore rispetto al caso di vectoring indipendente. In generale, questo schema migliora leggermente le prestazioni in termini di throughput medio nel caso di due operatori e nella regione in cui lo scenario in assenza di vectoring è già previsto che raggiunga l'obiettivo della DAE. Questo schema ha il vantaggio di ridurre notevolmente la variazione del bit rate tra i diversi utenti, come mostrano le simulazioni con il modello del 99%. Infatti, tra il throughput medio e il throughput 99% vi è una perdita di circa 30 Mbit/s, mentre nel caso vectoring indipendente la perdita può essere molto più alta, come si può vedere in Figura 12a dove l'EVDSL a 300 m perde circa 60 Mbit/s.

6. Conclusioni

L'Agenda Digitale per l'Europa (DAE) stabilisce che entro il 2020 dovrebbero essere messe a disposizione del 50% delle famiglie europee connessioni a Internet di almeno 100 Mbit/s. Per questo scopo, in questo documento sono state valutate le prestazioni della tecnica Vectoring applicata alla tecnologia VDSL2 17a in diversi scenari reali, utilizzando apparati commerciali e un simulatore di cavo e diafonia. Si è focalizzata l'attenzione principalmente sui nuovi scenari evolutivi della rete di accesso convenzionale, che comprendono diverse tecnologie che possono coesistere contemporaneamente. Questi segnali viaggiando su doppi in rame che condividono un unico cavo causano diafonia su coppie vicine e di conseguenza porta ad una penalizzazione sul massimo bit rate ottenibile. La tecnica vectoring permette di affrontare questi problemi, ma le migliori prestazioni si ottengono applicando il vectoring a tutte le

linee all'interno del cavo, ottenendo un miglioramento delle prestazioni di circa il 40%. Tuttavia, in uno scenario operativo reale le linee possono essere gestite da operatori diversi o provenire da DSLAM posizionati in luoghi diversi della rete, rendendo difficile l'implementazione del vectoring completo. Per questo motivo, sono state valutate le prestazioni del VDSL2 17a Vectoring sotto l'azione della diafonia da linee aliene dovuta alla stessa tecnologia e i risultati hanno mostrato un incremento di prestazioni del 25% rispetto al caso di assenza di vectoring. Tali risultati sono promettenti per il raggiungimento degli obiettivi della strategia Europa 2020 in termini di prestazioni della connettività di utente. Per quanto riguarda l'efficienza energetica, è stato misurato l'impatto sul consumo energetico del carico computazionale aggiuntivo dovuto al vectoring ed è risultato essere minimo, portando quindi ad una riduzione del consumo di energia per bit/s. Inoltre, in questo lavoro sono state confrontate diverse soluzioni basate su rame per la fornitura di connessioni a Internet ultrabroadband a utenti residenziali, sempre prestando particolare attenzione allo scenario in cui gli utenti condividono lo stesso cavo ma sono abbonati a operatori diversi. Si è mostrato che le soluzioni FTTB basate sul G.fast e le soluzioni FTTC basate sull'EVDSL sono in grado di soddisfare gli obiettivi della DAE senza la necessità del vectoring. La soluzione ibrida di vectoring indipendente con divisione di frequenza, in cui le bande più alte sono divise tra gli operatori, equalizza il servizio sperimentato da parte degli utenti, ma fornisce guadagni di throughput limitati. Un vero e proprio Multi Operator Vectoring (MOV) è necessario per andare oltre gli obiettivi della DEA e di fornire fino a 300 Mbit/s alla maggior parte degli utenti.

I risultati contenuti in questo lavoro sono stati ottenuti grazie alle sperimentazioni condotte all'interno del progetto "Accesso a banda larga FTTB-FTTC: tecnologie e scenari di competizione", finanziato dall'Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione – Ministero dello Sviluppo Economico.

Bibliografia.

[1] European Commission, «Europe 2020 strategy > Pillar IV: Fast and ultra-fast Internet access». <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/our-goals/pillar-iv-fast-and-ultra-fast-internet-access>.

[2] M. Dècina (Responsabile, Politecnico di Milano), S. Bregni, R. Casale, G. Cerquozzi, P. Giacomazzi, G. Maier, A. Pattavina e R. Melen, «Programma ISBUL, report del Work Package 1.1. “Infrastruttura di rete fissa NGAN”», 2009.

[3] F. Mazzenga, M. Petracca, F. Vatalaro, R. Giuliano e G. Ciccarella, «Coexistence of FTTC and FTTP network architectures in different VDSL2 scenarios», *Emerging Telecommunication Technologies*, Volume 27, Issue 2, pp. 158-169, Febbraio 2016.

[4] ITU-T, «Recommendation G.992.1 - Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers», 06/1999.

[5] ITU-T, «Recommendation G.992.3 - Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2)», 04/2009.

[6] ITU-T, «Recommendation G.992.5 - Asymmetric digital subscriber line 2 transceivers (ADSL2)- Extended bandwidth ADSL2 (ADSL2plus)», 01/2009.

[7] ITU-T, «Recommendation G.993.1 - Very high speed digital subscriber line transceivers (VDSL)», 06/2004.

[8] ITU-T, «Recommendation G.993.2 - Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)», 01/2015.

[9] ITU-T, «Recommendation G.9700 - Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Power spectral density specification», 04/2014.

[10] ITU-T, «Recommendation G.9701 - Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Physical layer specification», 12/2014.

[11] W. Coomans, R. B. Moraes, K. Hooghe, A. Duque, J. Galaro, M. Timmers, A. J. van Wijngaarden, M. Guenach e J. Maes, «XG-FAST: Towards 10 Gb/s Copper Access», in *Globecom Workshops*, 2014.

[12] Broadband Forum, «MR-257 - An Overview of G.993.5 Vectoring», May 2012.

[13] ITU-T, «Recommendation G.993.5 - Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers», 01/2015.

[14] V. Attanasio, A. Valenti, F. Persia, A. Rufini, S. Penna, D. Del Buono, G. Verticale e G. Maier, «Evaluation of the hybrid FTTx/VDSL2-Vectoring approach in an access network», in *18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 07/2016.

[15] Broadband Forum, «TR-249 - Testing of G.9932 Self-FEXT Cancellation (vectoring) Issue: 1», 2014.

[16] G. Heliotis, L. P. Dimos, I. Kordoulis e G. Agapiou, «Performance and Limitations of VDSL2-based Next Generation Access Networks», *Journal of Telecommunications and Information Technology*, pp. 98-102, 2013.

[17] V. Attanasio, S. Penna, G. Maier, G. Verticale, A. Rufini e A. Valenti, «Ultra broadband access network performance in a multi operator scenario», in *17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks)*, 09/2016.

[18] ITU-T, «Recommendation G.997.1 - Physical layer management for digital subscriber line transceivers», 06/2012.

[19] ATIS, «ATIS-0600024 - Multiple-Input Multiple-Output Crosstalk Channel Model», 04/2009.

[20] Alcatel-Lucent, «Vplus: some infos & market opportunities», *Presentation*, 2013.

[21] F. Vatalaro, F. Mazzenga e R. Giuliano, «Metodo e apparato di moltiplicazione per accesso su coppia metallica a divisione di frequenza con impiego della tecnica vectoring». Italian Patent filing N. 102015000060081, 09/10/2015.