



POLITECNICO DI TORINO  
Repository ISTITUZIONALE

Network Virtual Machine (NetVM): Portabilità ed efficienza nell'elaborazione di pacchetti di rete

*Original*

Network Virtual Machine (NetVM): Portabilità ed efficienza nell'elaborazione di pacchetti di rete / DEGIOANNI L.; BALDI M.; BUFFA D.; RISSO F.; STIRANO F.; VARENNI G.. - (2005). ((Intervento presentato al convegno AICA 2005 tenutosi a Udine (Italy) nel October 5-7, 2005.

*Availability:*

This version is available at: 11583/1494589 since:

*Publisher:*

AICA

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# **NETWORK VIRTUAL MACHINE (NETVM): PORTABILITÀ ED EFFICIENZA NELL'ELABORAZIONE DI PACCHETTI DI RETE**

Loris Degioanni\*, Mario Baldi\*, Diego Buffa\*\*, Fulvio Riso\*, Federico Stirano\*\*\*, Gianluca Varenni\*

\* Politecnico di Torino, Dipartimento di Automatica e Informatica, Torino, Italy

\*\*Telecom Italia Labs - System On Chip, Torino, Italy

\*\*\*Istituto Superiore Mario Boella, Torino, Italy

{mario.baldi,loris.degioanni,fulvio.riso,gianluca.varenni}@polito.it;  
stirano@ismb.it; diego.buffa@tilab.com

*Un progettista di dispositivi di rete deve affrontare, oltre alle problematiche di prestazioni legate all'aumento della velocità di rete, anche la necessità di aumentare la programmabilità di tali dispositivi al fine di semplificare l'implementazione di applicazioni come, ad esempio, firewall e sistemi per l'individuazione di intrusioni (intrusion detection system, IDS). Questo articolo presenta la nostra attività di progettazione e realizzazione di un network processor virtuale, chiamato NetVM, che dispone di un insieme di istruzioni ottimizzate per l'elaborazione dei pacchetti. La NetVM si prefigge di fornire uno strato di compatibilità per l'elaborazione di pacchetti (come ad esempio il filtraggio, il conteggio, lo string matching) eseguiti da varie applicazioni (firewall, network monitor, IDS) così che possano essere eseguiti da un qualunque apparato di rete, dal costoso router al piccolo dispositivo (come ad esempio uno smart phone). Inoltre, la NetVM permetterà di ottenere in modo efficiente corrispondenza tra le sopracitate funzionalità di elaborazione di pacchetti e unità hardware specifiche (come ad esempio, ASIC, FPGA, ed elementi per l'elaborazione di rete) presenti in specifici sistemi hardware, come apparati di rete o loro componenti.*

## **1. Introduzione**

Oggigiorno le reti richiedono una sempre maggiore velocità di elaborazione dei pacchetti. Inoltre, sempre più intelligenza viene richiesta alla rete che implica la necessità di realizzare elaborazione complessa e flessibile dei pacchetti in transito. Questo è vero in particolare per applicazioni di sicurezza di rete come firewall, sistemi per l'individuazione di intrusioni (intrusion detection system, IDS) e funzionalità di filtraggio in generale. Ciò rende non applicabile l'uso di ASIC (application specific integrated circuits) specifici per l'elaborazione dei pacchetti. Infatti, sebbene un ASIC garantisce un tasso di elaborazione di pacchetti estremamente alto, non può essere riprogrammato e il tempo necessario allo sviluppo (e alla prototipazione) di un nuovo chip diventa sempre più alto.

Una soluzione che potrebbe garantire alti tassi di elaborazione dei pacchetti, una nuova forma di programmabilità e un ridotto tempo di sviluppo si può

trovare nei Network Processor. Questi sono chip programmabili le cui architetture sono rivolte in particolare all'elaborazione dei pacchetti. Le loro prestazioni sono ottenute dalla sinergia di differenti componenti. Primo, una unità centrale di elaborazione basata sul paradigma RISC (che è risaputo essere molto veloce) che include un insieme ridotto di istruzioni, cioè quelle più significative per l'elaborazione dei pacchetti (ad esempio mentre le istruzioni in virgola mobile non sono presenti, ci sono istruzioni speciali per la manipolazione dei bit). Secondo, realizzano un alto grado di parallelismo poichè potrebbero esserci differenti unità di esecuzione, all'interno di quella principale, in grado di eseguire più frammenti di codice in parallelo. Terzo, prevedono alcuni moduli hardware specifici in grado di eseguire compiti complessi solitamente necessari per l'elaborazione dei pacchetti (ad esempio motori di accelerazione per la ricerca in tabelle).

Come una generica CPU può essere utilizzata per l'elaborazione dei pacchetti, anche una VM generica (come CLR [1] o JAVA [2]) può essere impiegata per tale scopo. Non essendo, tuttavia, ottimizzate per questo compito, non soddisferanno mai le aspettative di prestazioni di una VM specializzata in termini di velocità, consumo di memoria e tempi di elaborazione. Questo articolo fornisce una prima relazione di un progetto che ambisce a definire un architettura di una macchina virtuale ottimizzata per la programmazione di rete, chiamata Network Virtual Machine (NetVM). Questo lavoro ha il potenziale di:

- Semplificare e velocizzare lo sviluppo di applicazioni ottimizzate per l'elaborazione dei pacchetti, come firewall, traffic monitor, router;
- Abilitare una corrispondenza efficiente tra l'esecuzione di moduli software che eseguono compiti specifici e componenti ottimizzati di architetture hardware adattate;
- Fornire un ambiente di programmazione unificato per varie architetture hardware;
- Offrire la portabilità di applicazioni per l'elaborazione dei pacchetti su differenti piattaforme hardware e software;
- Fornire una architettura di riferimento per l'implementazione di sistemi di rete hardware (integrati);
- Fornire un nuovo strumento di specifica, prototipazione rapida, e implementazione di sistemi di rete hardware (integrati) finalizzati a una specifica applicazione di elaborazione dei pacchetti.

Il paragrafo 2 sottolinea le motivazioni e i potenziali benefici che si possono trarre da questo lavoro, ed esamina in maniera ancor più approfondita le implicazioni sopracitate. L'architettura proposta della NetVM è spiegata nel paragrafo 3 e le problematiche di prestazioni sono illustrate nel paragrafo 4. Il paragrafo 5 trae alcune conclusioni e riassume i lavori correnti e futuri.

## **2. Motivazioni e Benefici**

NetVM si prefigge di essere una piattaforma portabile, ma efficiente per le applicazioni che hanno necessità di elaborare pacchetti tra cui particolare rilevanza hanno le applicazioni per la sicurezza di rete. Se quando la NetVM è eseguita da una CPU generica potrebbe risultare meno efficiente rispetto a

codice scritto nativamente, potrebbe verificarsi il contrario quando la NetVM viene eseguita da un network processor o un sistema con un hardware e una architettura specifica. Infatti le istruzioni della NetVM specifiche per il networking possono essere efficientemente proiettate in unità funzionali ad hoc (ad esempio ASIC e FPGA) che sono state progettate per eseguire i loro compiti in maniera ottimale.

Una delle problematiche relative ai network processor è la loro complessità dal punto di vista della programmabilità. Ciascun dispositivo dispone di un proprio ambiente di programmazione che solitamente include un compilatore simil-C, che differisce non solo da costruttore a costruttore, ma anche da differenti linee di prodotto di un singolo costruttore. Comunque, approcci di alto livello come la programmazione C non sono la soluzione ideale, in quanto il C è stato inventato per la programmazione di uso generale: esso difetta di parecchie caratteristiche che possono aiutare lo sviluppo di programmi per la rete e include, invece, caratteristiche che non sono necessarie. Per esempio i linguaggi di alto livello forniti difettano di alcune funzioni standard (quelle che non dovrebbero essere correlate all'elaborazione per il networking), mentre ne rendono disponibili di nuove (alcune che sono necessarie per poter sfruttare al meglio alcune caratteristiche del chip); pertanto non esistono garanzie per la portabilità.

Di conseguenza, il modo più proficuo per programmare questo tipo di dispositivi (e ottenere programmi efficienti da quest'ultimi) è quello di usare il linguaggio assembly nativo, che è dispendioso in termini di tempo e soggetto a errori. Ciò richiede non solo un'approfondita conoscenza della macchina, ma anche una non trascurabile quantità di tempo per programmare il dispositivo. Inoltre, portare un programma da una piattaforma ad un'altra (anche se appartenente allo stesso costruttore) è un incubo.

L'idea su cui si basa l'architettura della NetVM (Network Virtual Machine) è di mantenere le alte prestazioni fornite dai network processor e al contempo aggiungere un grado di programmabilità ragionevole. Primo, la NetVM definisce l'architettura di un nuovo network processor, che è l'architettura di riferimento che si prefigge di compiere i compiti più comuni necessari per l'elaborazione dei pacchetti. Inoltre, definisce una metodologia per estendere tale architettura mediante funzionalità aggiuntive (come ad esempio processori hardware dedicati) al fine di garantirne la personalizzazione. Secondo, definisce un linguaggio assembly necessario a programmare questi dispositivi virtuali e un insieme di specifiche relative alla interazione tra ciascun blocco (ad esempio memoria, unità di esecuzione, ecc.) all'interno della NetVM. Terzo, definisce come un'applicazione può interagire con questi componenti, ad esempio come scaricare del codice, come ottenere dei risultati e così via.

Il principale scopo della NetVM è di fornire ai programmatori un riferimento architetturale, tale che possano concentrarsi su cosa fare sui pacchetti, piuttosto che come farlo. Ciascun fornitore può definire un compilatore per la propria piattaforma che traduce questo codice in codice specifico per il dispositivo. Ciò garantisce un alto grado di portabilità del codice su differenti

dispositivi, mantenendo, al contempo, le caratteristiche di prestazioni del network processor.

Spingendosi un po' oltre, la NetVM architettura potrebbe essere implementata in hardware, cioè l'architettura della macchina virtuale potrebbe essere utilizzata (come base) per il progetto di una architettura hardware per l'elaborazione di rete (ad esempio, un network processor). Analogamente, il codice della NetVM che implementa un insieme di funzionalità, potrebbe essere compilato nella descrizione hardware di un sistema (possibilmente integrato) che implementa tali funzionalità (come ad esempio un ASIC o un FPGA). In altre parole, la NetVM potrebbe fornire supporto per prototipazione veloce, alla specifica e all'implementazione di un sistema hardware orientato alla rete.

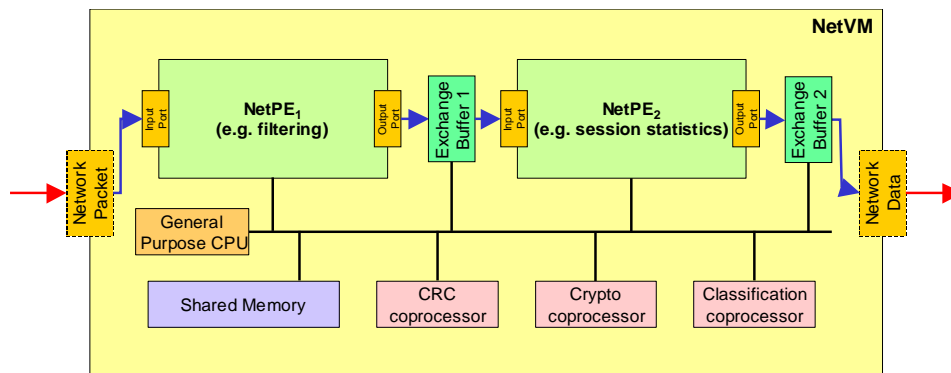


Figura 1. Esempio di impiego di una NetVM.

La Figura 1 illustra un esempio di impiego di un ambiente di NetVM: l'intera architettura è costruita intorno all'elemento di elaborazione. Come mostrato in figura, ciascun NetPE (analogamente a una unità di elaborazione di network processor) isola una specifica funzionalità e usa alcune unità funzionali specializzate (co-processor) e alcune memorie condivise per scambiare dati e pacchetti tra tutti gli elementi della macchina virtuale.

### 3. Architettura dalla NetVM

I principali obiettivi della NetVM sono **flessibilità**, **semplicità** ed **efficienza**. Tali obiettivi e l'esperienza maturata nel campo delle architetture per network processor hanno determinato le principali scelte architetture del progetto.

Il processamento dei pacchetti, come ben noto, è adatto a una elaborazione in serie a stadi multipli, o anche in parallelo: infatti, le varie fasi possono essere suddivise facilmente tra piccole unità di processamento di ridotte prestazioni. Per questo, la NetVM ha un'architettura modulare costruita intorno al concetto di *Unità di Elaborazione (Processing Element – NetPE)*, che virtualizza (o, come sarebbe meglio dire, si ispira a) i micro-elaboratori presenti in un processore di rete reale.

Le singole Unità di Elaborazione (sia quelle integrate che quelle realizzate via software) devono occuparsi solo di compiti ridotti, ma lo devono fare con stringenti vincoli di prestazioni: devono elaborare i dati alla velocità di linea e in

tempo reale, devono processare dati con una dimensione variabile (ad esempio il campo dati di un pacchetto IP) e/o dati frammentati (ad esempio un pacchetto IP suddiviso su diverse celle ATM). Di conseguenza, questi semplici elementi devono possedere meccanismi per un'avanzata gestione della memoria ed eseguire algoritmi di schedulazione nel caso le unità abbiano accesso diretto alla memoria. Inoltre, sono responsabili di compiti molto specifici, come ricerche binarie in complesse strutture ad albero e calcolo di CRC (Codice a Ridondanza Ciclica) che devono essere eseguiti in tempi molto ristretti.

La capacità di eseguire operazioni distinte contemporaneamente dovrebbe essere una caratteristica basilare di un processore di rete, perciò bisogna tener conto di questo aspetto durante la fase di progetto dell'architettura: infatti i pacchetti sono sufficientemente indipendenti tra di loro ed è possibile processarli separatamente. Per esempio, uno dei primi network processor – Intel IXP 1200 – è composto da sei unità di elaborazione chiamate “Packet Engines”. Maggiore è il numero di unità, maggiore è il grado di parallelismo raggiungibile, dal momento che pacchetti indipendenti possono essere distribuiti sui diversi elementi.

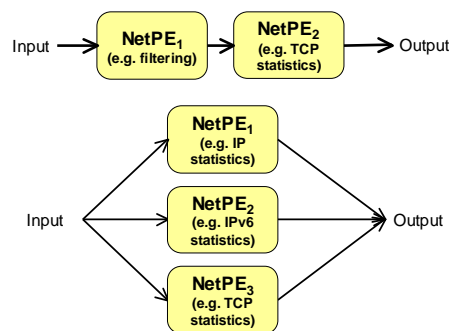


Figura 2. Diversi NetPE organizzati in serie (in alto) o in parallelo (in basso).

Nell'architettura della nostra NetVM, un NetPE è una CPU virtuale (con un opportune insieme di istruzioni e una memoria locale) la quale esegue un programma in linguaggio nativo per svolgere una singola funzione all'interno della NetVM ed ha uno stato privato. Un'applicazione per NetVM è realizzata con la combinazione di vari NetPE (ad esempio, in Figura 1 è rappresentata un'applicazione formata da due NetPE) ognuno dei quali esegue uno specifico compito; strutture più complesse possono essere realizzate collegando diversi NetPE tra di loro. Una tale visione modulare deriva dall'osservazione che la maggior parte delle applicazioni di elaborazione di pacchetti possono essere scomposte in blocchi più semplici, i quali, opportunamente combinati, possono dar luogo a strutture complesse. I singoli blocchi possono lavorare sia in parallelo, sia in serie per raggiungere alte prestazioni. L'approccio modulare non è una novità: altre soluzioni realizzate in software, come *NetFilter* [17] o *Click* [19] hanno dimostrato la loro validità, e molti network processor seguono la stessa strada del parallelismo, basandosi su un elevato numero di semplici micro-processori.

La Figura 2 mostra come è possibile collegare tra loro i NetPE per realizzare strutture di complessità maggiore, sia in serie che in parallelo. Nel primo caso, i pacchetti in uscita da un elemento sono passati all'interfaccia di ingresso del successivo. Nel secondo caso i pacchetto in arrivo da una singola sorgente sono elaborati in parallelo da due o più NetPE.

### 3.1. NetPE: l'unità di elaborazione di base

Il NetPE è il cuore della NetVM. È l'unità fondamentale che esegue il codice compilato, compiendo l'effettiva elaborazione dei dati in arrivo dalla rete.

Come la maggior parte dei processori virtuali disponibili, la NetVM ha una struttura basata su *stack*. Un processore virtuale basato su stack garantisce portabilità, un insieme di istruzioni compatto e una macchina virtuale semplice. La principale conseguenza di questa scelta è l'assenza di registri generici e tutte le istruzioni che necessitano di memorizzare o elaborare un valore fanno uso dello stack. Ogni NetPE ha il proprio stack indipendente.

Il modello di esecuzione è basato su *eventi*. Ciò significa che l'entrata in funzione di un particolare NetPE è determinata da eventi esterni, ognuno dei quali scatena l'esecuzione di una particolare porzione di codice. Eventi tipici sono l'arrivo di un pacchetto da un'interfaccia di ingresso, la richiesta di un pacchetto sull'interfaccia di uscita o lo scattare di un timer.

#### *Il codice nativo dei NetPE*

L'insieme delle istruzioni della NetVM è ricavato da quello utilizzato da un generico processore basato su stack, con aggiunte specifiche dovute alla particolare architettura e destinazione d'uso di questa macchina virtuale. Le istruzioni possono essere suddivise in diverse categorie; le più importanti sono elencate nella TABELLA I.

TABELLA I  
ESEMPIO DI ALCUNE ISTRUZIONI PRESENTI NEL CODICE NATIVO DI UN NETPE.

Categoria	Descrizione	Esempio	Descrizione
Inizializzazione	Inizializzazione dell'esecuzione di un'applicazione NetPE	set.share	Imposta la dimensione della memoria condivisa
Trasferimento dati	Trasferimento di dati all'interno della memoria	dpcopy	Copia un buffer di memoria da una posizione ad un'altra
Ricerca di stringhe	Controllo di un valore in un buffer di memoria con il valore in cima allo stack	field.eq.8	Confronta il valore in cima allo stack con un valore a 8 bit in memoria
Controllo di flusso	Controllo del flusso di esecuzione dell'applicazione	jump	Salto senza condizioni
Gestione dello stack	Gestione dello stack	swap	Scambia i due elementi in cima allo stack
Aritmetica e Logica	Calcolo di semplici operazioni	ror	Rotazione a destra del valore in cima allo stack

Avendo come obiettivo l'esecuzione di applicazioni di rete, l'insieme delle istruzioni della NetVM comprende un gruppo di istruzioni specifiche, non presenti nei tradizionali elaboratori basati su stack. La maggior parte di queste

istruzioni riflettono le funzioni che alcuni network processor forniscono per velocizzare l'elaborazione delle intestazioni dei pacchetti. Nella TABELLA II sono evidenziate alcune di queste istruzioni.

Dal momento che, potenzialmente, la NetVM potrebbe essere mappata su sistemi integrati e network processor, l'uso di sistemi di gestione della memoria avanzati quali il "ripulitore" (garbage collector) non può essere considerato una soluzione valida. Perciò, il linguaggio nativo ha una visione della memoria direttamente a basso livello. Inoltre, la memoria è allocata *in modo statico* durante la fase di inizializzazione: il programma stesso, grazie a opportune istruzioni, specifica la quantità di memoria necessaria per un corretto funzionamento. Ovviamente, queste istruzioni possono fallire se non è presente una quantità sufficiente di memoria fisica.

TABELLA II  
ESEMPIO DI ISTRUZIONI SPECIFICHE PER L'ELABORAZIONE DI PACCHETTI.

Istruzione	Descrizione
find.bit	Trova il bit impostato. Restituisce la posizione del primo bit impostato a uno all'interno del valore in cima allo stack.
mfind.bit	Trova il bit impostato, con maschera. Restituisce la posizione del primo bit impostato a uno all'interno del valore in cima allo stack, versione con maschera.
clz	Conta gli zeri iniziali. Conta il numero di zeri consecutivi a partire dal bit più significativo nel valore in cima allo stack.
set.bit	Imposta a uno il bit specificato come parametro nel valore in cima allo stack.
clear.bit	Azzera o inverte il bit specificato come parametro nel valore in cima allo stack.
flip.bit	Inverte il bit specificato come parametro nel valore in cima allo stack:
test.bit	Test condizionale su un bit del valore in cima allo stack.
field.c.t	Confronta un valore di dimensione $t$ nella memoria pacchetto con il valore in cima allo stack. Salta se la condizione $c$ è soddisfatta. $t$ può valere 8, 16 o 32 (dimensione in bit); $c$ può valere eq (uguale a), ne (non uguale a), lt (minore di), le (minore o uguale a), gt (maggiore di), ge (maggiore o uguale a). questa istruzione può essere usata come aiuto nella decodifica di un'intestazione specifica di un protocollo.

La flessibilità persa con questo approccio è bilanciata da un guadagno in efficienza: il programma può accedere alla memoria senza intermediari grazie a opportune istruzioni di caricamento e salvataggio dati. Per lo stesso motivo, istruzioni specifiche per la copia di buffer di memoria (un'operazione ricorrente nell'elaborazione di rete; alcune piattaforma possiedono anche unità hardware dedicate) sono disponibili, sia per copie all'interno della stessa memoria, che tra memorie differenti. Inoltre, la conoscenza della posizione e della dimensione della memoria prima che il programma sia lanciato permette accessi molto veloci quando si usa un compilatore di tipo JIT in quanto gli indirizzi di memoria possono essere pre-calcolati.

I pacchetti sono memorizzati in buffer specifici, chiamati *buffer di scambio*, che sono condivisi tra due NetPE sullo stesso cammino di elaborazione in modo da minimizzare i problemi di condivisione durante lo scambio dei dati. Per ottimizzare la gestione dei pacchetti rendendola il più veloce possibile, istruzioni specifiche relative ad operazioni di rete (ad es. ricerca di stringhe) e coprocessori aggiuntivi potrebbero avere accesso diretto a questi buffer. Allo



stesso modo sono fornite istruzioni per il trasferimento dei dati (in ingresso e in uscita, o all'interno dei buffer di scambio).

### 3.2. Coprocessori

Come i network processor integrati aggiungono funzionalità specifiche ai processori generici composti da un singolo chip, analogamente la NetVM aggiunge funzionalità specifiche per l'elaborazione di rete ad un insieme standard di istruzioni per strutture basate su stack. Queste aggiunte specifiche prendono il nome di *coprocessori*.

Questo approccio ha un doppio vantaggio. Primo, i coprocessori possono essere mappati su funzionalità (ove presenti) dei network processor, sfruttando l'hardware avanzato e i coprocessori di cui spesso sono forniti. Questo permette di incrementare enormemente l'efficienza dei programmi quando la piattaforma da emulare fornisce l'hardware adatto. Per esempio, un programma che utilizza la funzionalità CRC32 di un coprocessore CRC sarà molto più efficiente e semplice su una piattaforma con hardware dedicato per il calcolo del CRC. Secondo, su sistemi generici questi coprocessori permettono l'uso di algoritmi ottimizzati. Essi condividono codice e strutture dati tra moduli differenti, garantendo in questo modo un buon utilizzo delle risorse. Per esempio, in una configurazione con diversi NetPE che utilizzano la funzione CRC32, lo stesso coprocessore può essere utilizzato da tutti i NetPE. Inoltre, se un nuovo algoritmo aumenta l'efficienza della funzione CRC32, tutti i NetPE che utilizzano tale funzione diventano più veloci, migliorando in questo modo l'intera configurazione e non solo quella di un singolo modulo. Infine, compiti quali ricerca di stringhe o classificazione possono condividere strutture dati e tabelle tra moduli differenti per una efficienza ancora migliore e un'ottimizzazione nell'utilizzo di risorse. Un esempio è l'algoritmo Aho-Corasick per la ricerca di stringhe, il quale utilizza un solo automa a stati per ricercare stringhe multiple.

I NetPE comunicano con i coprocessori attraverso interface ben definite. In Figura 1 (parte inferiore) sono rappresentati alcuni coprocessori che possono essere presenti nel progetto di una NetVM base.

## 4. Valutazione delle prestazioni

Nonostante l'attuale implementazione della NetVM sia ancora in uno stato embrionale, è possibile determinare alcune misure per valutare la bontà dell'architettura proposta.

Questa valutazione preliminare delle prestazioni è stata fatta confrontando la NetVM con il BPF, probabilmente la macchina virtuale più conosciuta nell'ambito dell'elaborazione di rete. La Figura 3 mostra un breve programma nel linguaggio nativo del BPF che, data una trama Ethernet, determina se la trama contiene un pacchetto IP. La Figura 4 mostra un programma simile scritto, però, nel linguaggio nativo della NetVM.

Ad un primo sguardo si nota che il codice nativo della NetVM è decisamente più ricco di quello del BPF, dando una prima idea delle potenzialità del linguaggio

della NetVM. Tuttavia, il programma finale è di gran lunga meno compatto (il nucleo del programma è composto da sei istruzioni contro le tre richieste dal linguaggio del BPF). Ciò deriva da una delle più importanti caratteristiche dell'architettura della NetVM: la macchina virtuale basata su stack è meno efficiente di una macchina virtuale basata su registri (come il BPF) in quanto non si può appoggiare su un insieme di registri generici. Non si possono, quindi, confrontare direttamente le prestazioni ottenute con la NetVM con quelle ottenute con il BPF, senza tener conto di questo fattore.

```
(0) ldh [12] ; load the ethertype field
(1) jeq #0x800 jt 2 jf 3 ; if true, jump to (2), else to (3)
(2) ret #1514 ; return the packet length
(3) ret #0 ; return false
```

Figura 3. Esempio di codice che filtra pacchetti IPv4 con la macchina virtuale BPF.

```
; Push Port Handler
; triggered when data is present on a push-input port
segment .push

.locals 5
.maxstacksize 10

pop ; pop the "calling" port ID
push 12 ; push the location of the ethertype
upload.16 ; load the ethertype field
push 2048 ; push 0x800 (=IP)
jcmp.eq send_pkt ; compare the 2 topmost values; jump if true
ret ; otherwise do nothing and return

send_pkt:
pkt.send out1 ; send the packet to port out1
ret ; return
ends
```

Figura 4. Esempio di codice che filtra pacchetti IPv4 con la macchina virtuale NetVM.

TABELLA III  
VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DELLA NETVM.

Macchina Virtuale	Tempo per eseguire il filtro "IPv4" (cicli di clock)
NetVM	392
BPF	64

La TABELLA III mostra il tempo necessario per eseguire i programmi esposti in Figura 3 e Figura 4: come ci si poteva aspettare, il BPF ha prestazioni migliori della NetVM. Inoltre la NetVM è penalizzata non solo dalla presenza di istruzioni aggiuntive, ma anche dal fatto che il codice del BPF è tradotto direttamente nel codice nativo dei processori x86, mentre le istruzioni della NetVM sono interpretate durante l'esecuzione del programma.

Tuttavia, una NetVM va intesa come sistema di riferimento e non ci si aspetta che il suo codice sia eseguito così com'è. Per migliorare le prestazioni, il codice

NetVM deve essere tradotto nel codice nativo (attraverso una ricompilazione durante l'esecuzione) secondo le caratteristiche della piattaforma finale. Ciò giustifica la scelta di una macchina basata su stack, che è intrinsecamente più lenta, ma le cui istruzioni sono più semplici da tradurre in codice nativo. Ci si aspetta di ottenere prestazioni decisamente superiori dopo una ricompilazione dinamica. L'implementazione di un compilatore di tipo *just in time* (JIT) è parte del lavoro futuro sulla NetVM.

## 5. Conclusioni

Questo articolo presenta l'architettura della Network Virtual Machine (NetVM), una macchina virtuale ottimizzata per la realizzazione di applicazioni fortemente basate sull'elaborazione di pacchetti, tra cui spiccano per importanza le applicazioni per la sicurezza di rete. Questo articolo discute le motivazioni alla base della definizione di tale architettura e i benefici che si possono trarre dal suo impiego in diverse piattaforme hardware. Questi includono la semplificazione e velocizzazione dello sviluppo di applicazioni per l'elaborazione dei pacchetti la cui esecuzione può essere efficientemente delegata a componenti specializzati di architetture hardware personalizzate. In aggiunta, la NetVM fornisce un ambiente di programmazione unificato per diverse architetture hardware offrendo, pertanto, la portabilità di applicazione per l'elaborazione dei pacchetti su differenti piattaforme hardware e software. Inoltre, l'architettura proposta può essere usata come architettura di riferimento per l'implementazione di sistemi di rete hardware (integrati). Infine, la NetVM può essere usata come uno strumento innovativo per le specifiche, la prototipazione veloce, e l'implementazione dei sistemi di rete hardware (integrati).

Alcuni risultati preliminari delle prestazioni di un semplice programma NetVM mostrano che altre macchine virtuali più semplici, pensate per applicazioni di rete, superano in prestazioni la NetVM che, a sua volta, fornisce una maggiore flessibilità. L'attività corrente di realizzazione di un compilatore Just In Time (JITTER) per il codice NetVM ha lo scopo di ribaltare o almeno di ridurre la discrepanza in termini di prestazioni.

Poiché scrivere codice nativo (bytecode) per la NetVM non è immediato, il lavoro è stato svolto nella direzione di definire un linguaggio di programmazione di alto livello e di implementare il compilatore corrispondente nel bytecode della NetVM. Infine, allo scopo di dimostrare a pieno i benefici, anche in termini di prestazioni, apportati dalla NetVM, attività ulteriori includono l'implementazione di una macchina virtuale e del suo JITTER per un network processor commerciale.

## 6. Riferimenti bibliografici

- [1] ECMA standard 335, Common Language Infrastructure (CLI), 2nd edition, December 2002.
- [2] T. Lindholm, F. Yellin, The Java Virtual Machine Specification Second Edition, 1999.
- [3] P. Russell et al., Netfilter, <http://www.netfilter.org>.
- [4] R. Morris, E. Kohler, J. Jannotti and M. F. Kaashoek: The Click modular router. Proceedings of the 1999 Symposium on Operating Systems Principles.