

Division of Labour and Adaptive Task Allocation: the StarLink Case

Matteo Berti

889889 - matteo.berti11@studio.unibo.it

Abstract. Un caso interessante di divisione del lavoro e allocazione delle attività è l'Internet satellitare. Una schiera di satelliti in orbita che devono soddisfare le richieste di terminali sulla terra. I satelliti, muovendosi più velocemente dei terminali, variano nel tempo il tipo di task da eseguire in base alla distanza mutevole dai terminali. Interessante è vedere come si comporta una rete di questo tipo, in che modo è in grado di soddisfare le richieste e sotto quali condizioni.

Keywords: Complex Systems, Network Science, StarLink, Satellites, Modeling.

1 Introduzione

StarLink è una costellazione di satelliti costruita dall'azienda americana SpaceX^[1] per fornire Internet satellitare a livello globale. La costellazione è formata da migliaia di piccoli satelliti che lavorano in combinazione a *transceivers* sulla terra. Un transceiver è un terminale che può sia inviare che ricevere dati.

La caratteristica di questa rete, a differenza delle infrastrutture già esistenti, è che è posizionata ad un'orbita molto più vicina alla terra. Questa condizione necessita di un moto satellitare più veloce di quello terrestre per evitare di cadere sotto la forza gravitazionale.

Ciò apre varie problematiche, tra cui le modalità con cui un satellite deve cambiare terminale da servire in base alla prossimità con esso, ed il ristretto raggio di "visione" che ha un satellite che orbita vicino al suolo. Questi aspetti saranno appunto oggetto di analisi nel seguente paper.

2 Preliminari

A livello implementativo la modellazione del caso di studio Star-Link è avvenuta tramite il sistema software NetLogo^[2]. Sono state seguite le linee guida indicate nelle specifiche del progetto del corso di Complex Systems and Network Science A.A 2019/2020^[3].

Un **satellite** è un *agente* del modello il cui scopo è eseguire le **task** richieste dai **terminali** sulla terra più vicini ad esso. Inoltre la visione dei terminali presi in considerazione è limitata da un raggio "d'azione".

Un **terminale** è un *transceiver* sulla terra con una certa posizione che richiede alla rete l'esecuzione di una qualche **task**. Il suo moto rotatorio è più lento di quello dei satelliti.

Una **task** è un'attività che un **terminale** richiede alla rete, e che un **satellite**, probabilmente il più vicino, prenderà in carico ed eseguirà. Le task nel modello possono essere di tre tipi:

- **Task 1: push** di un dato sulla rete.
- **Task 2: pull** di un dato dalla rete.
- **Task 3: aggiornamento** della rete.

3 Risultati

3.1 Modellazione

La modellazione segue le specifiche fornite per il progetto^[3] con qualche integrazione. Il modello *basato su threshold* prevede la presenza di uno stimolo s_j relativo all'esecuzione della task j da parte dell'agente, ed una threshold $\theta_{i,j}$ che rappresenta la soglia in base alla quale l'agente i esegue la task j .

Per meglio rappresentare lo scenario proposto da StarLink è stato aggiunto il parametro $d_{i,j}$ ovvero la distanza (euclidea) tra l'agente i e il terminale più vicino che richiede la task j . Di conseguenza la probabilità che un satellite i esegua la task j dato uno stimolo s_j è:

$$T_{\theta_{i,j}}(s_j) = \frac{s_j^n}{s_j^n + \mu \cdot \theta_{i,j}^n + \nu \cdot d_{i,j}^n}$$

In cui μ e ν sono due coefficienti positivi che modulano la rispettiva influenza di θ e d .

La probabilità che in un dato momento un satellite inattivo i **inizi** ad eseguire la task j è data da:

$$P(X_i = 0 \rightarrow X_i = j) = \left(\sum_{1 \leq k \leq m} T_{\theta_{i,k}}(s_k) \right) \cdot \frac{T_{\theta_{i,j}}(s_j)}{\sum_{1 \leq k \leq m} T_{\theta_{i,k}}(s_k)}$$

Mentre la probabilità che in un dato momento un satellite attivo i **smetta** di eseguire la task j è data da:

$$P(X_i = j \rightarrow X_i = 0) = p$$

Infine, l'evoluzione dello **stimolo** della task j è data dalla formula descritta nelle specifiche:

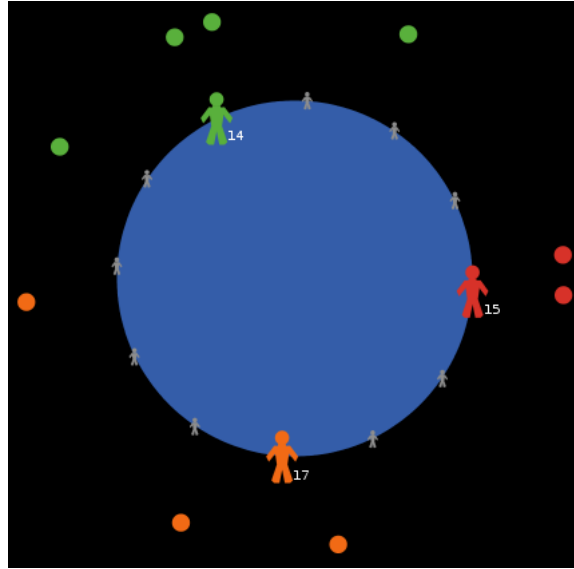
$$s_j(t+1) = s_j(t) + \delta - \frac{\alpha \cdot (\sum_i N_{i,j})}{N}$$

Un sistema di **specializzazione** è presente, e basato non sulla ripetitività nell'esecuzione di una task, ma bensì sulla vicinanza ad essa. Di seguito è illustrato come viene aggiornata la threshold dell'agente i relativa alla task j :

$$\theta_{i,j} = \begin{cases} \theta_{i,j} - (\omega - d_{i,j}) \cdot \Delta t & \text{se } d_{i,j} \leq \omega \\ \theta_{i,j} + d_{i,j} \cdot \Delta t & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (1)$$

In cui ω rappresenta il raggio di "azione" di ogni satellite: viene diminuita la threshold per le task il cui terminale è posto all'interno di tale area, al contrario la threshold viene aumentata per le task il cui terminale è esterno all'area di "azione". Di conseguenza più un satellite si avvicina ad un terminale che richiede una task, e più sarà probabile l'esecuzione di quella task^[4].

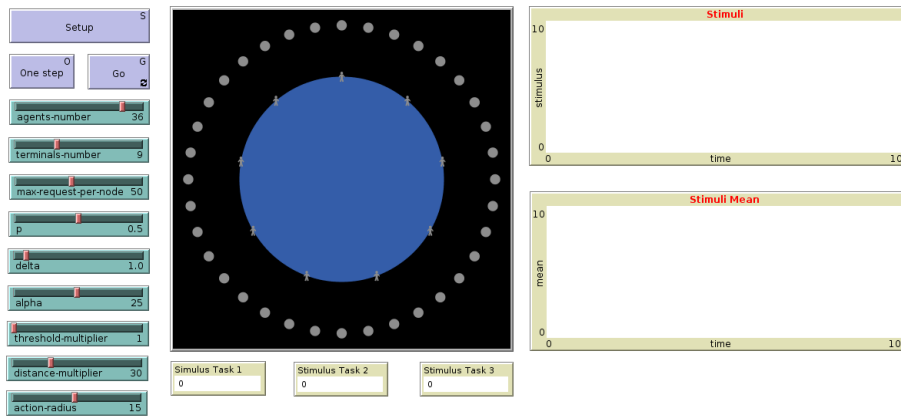
Di seguito un esempio di scenario con 3 terminali attivi, uno per ogni task, con rispettivamente 14, 17 e 15 di stimolo. Attorno è possibile vedere come i satelliti prendano in carico le task più vicine ad essi nello spazio:



3.2 Implementazione

Come indicato nelle informazioni preliminari, si è implementato il modello descritto sopra tramite il sistema software NetLogo^[2]. Il codice è disponibile in allegato nel file *StarLink.nlogo*.

L'interfaccia utente dopo il setup si presenta come segue:



Sul lato sinistro si ha tutta una serie di slider per manipolare lo scenario di esecuzione, oltre che i comandi di *setup* e *go*. Al centro vi è la simulazione grafica del modello, ovvero la terra al centro, con vari potenziali terminali, e tutt'attorno i satelliti della rete StarLink che

orbitano. Infine sul lato destro due grafici che mostrano l'andamento dello stimolo per ogni task e la media tra tutti e tre gli stimoli, ovvero quanto stimolo la rete deve mediamente soddisfare in un dato momento.

Per quanto riguarda il codice di esecuzione, a grandi linee ha la seguente struttura:

```

to go
  for-each task:
    update-stimuli-intensity
    distribute-total-task-stimulus-among-terminals

  for-each satellite:
    get-closest-terminal-by-task
    compute-reinforcement

    if agent-has-assigned-task:
      execute-task
      leave-task-with-probability-p
    else:
      assign-task-with-probability-T-theta
end

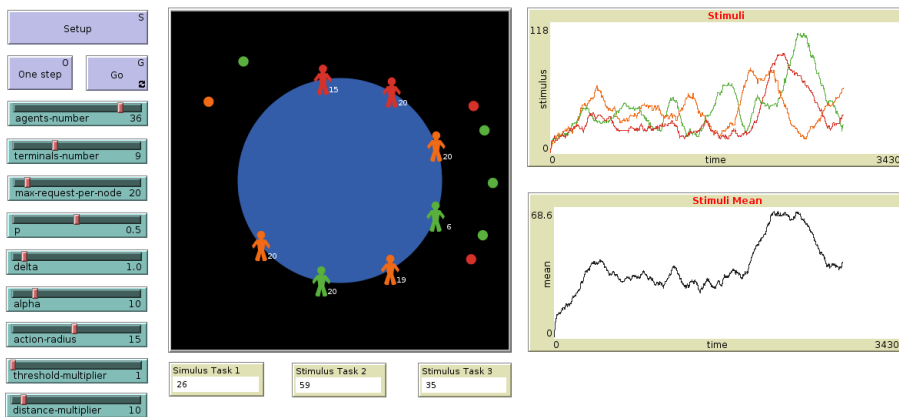
```

Il codice è stato scritto per essere il più versatile possibile, infatti sebbene le task fissate nel modello siano 3, si sono utilizzati ovunque possibile cicli for-each invece che la ripetizione del comando 3 volte, in modo che in caso di aggiunta o rimozione di ulteriori task sia sufficiente modificare la lunghezza dei cicli.

3.3 Osservazioni

Un andamento tipico, usando i parametri indicati sul lato sinistro, è quello mostrato nella prima immagine.

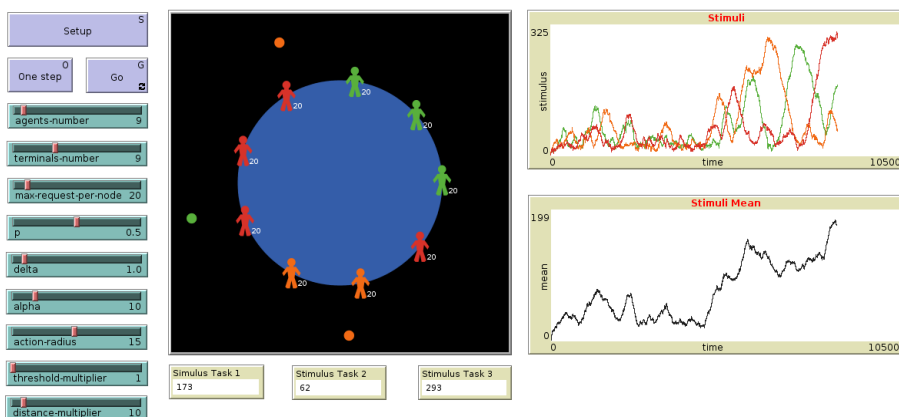
Ovvero vi è una prima fase in cui lo stimolo *sale*. Una seconda fase in cui lo stimolo rimane mediamente *stabile*. Ed una terza fase in cui lo stimolo inizia a *crescere rapidamente*, questo è il momento in cui la disponibilità di terminali che richiedono le task alla rete si satura. Come conseguenza dell'aumento di stimolo la probabilità che un satellite prenda in carico una task aumenta, in questo modo



diminuisce nuovamente lo stimolo a livello generale tornando stabile. L'andamento è a grandi linee sinusoidale, con picchi e ricadute più o meno periodici.

Tali fasi si ripetono nel tempo, tuttavia essendo questi eventi probabilistici vi è la possibilità in cui una volta saturati i terminali lo stimolo non venga soddisfatto in tempo utile, e cresca esponenzialmente. Questo scenario è più probabile al diminuire del rapporto satelliti disponibili / terminali disponibili.

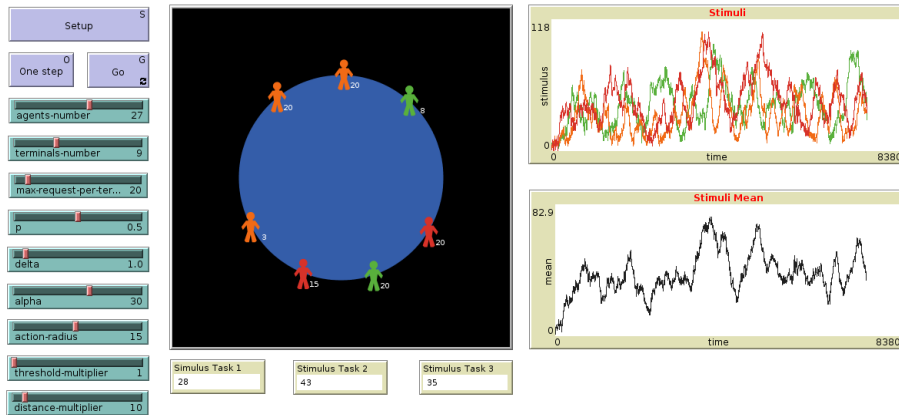
Di seguito un esempio in cui ad ogni terminale corrisponde un solo satellite. È evidente come tendenzialmente i satelliti facciano più fatica a soddisfare lo stimolo, e quest'ultimo tenda quindi a crescere:



È chiaro che aumentando il numero di stimolo massimo per terminale l'effetto sarebbe il medesimo illustrato sopra, solo che si verificherebbe più dilazionato nel tempo. Questo in quanto per saturare un terminale sarebbe necessario più stimolo.

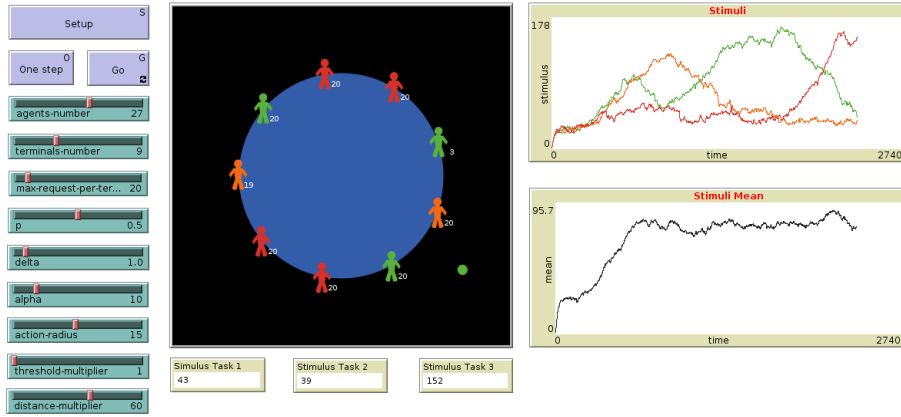
Aumentando il parametro α nel calcolo dello stimolo (da 10 a 30) si indica che l'esecuzione di una task da parte di un satellite è maggiormente efficiente. Di conseguenza è possibile osservare come l'andamento dello stimolo tenda ad essere più contenuto, raggiungendo picchi di stimolo meno alti.

Inoltre il momento in cui tutti i terminali vengono saturati di stimolo viene posticipato, in quanto i satelliti riescono a soddisfare più efficientemente le task. L'immagine mostra come in 7500 ticks lo stimolo medio arrivi al massimo a un valore di 80, piuttosto basso, e tendenzialmente l'andamento è più contenuto, senza crescite esponenziali consistenti. Ogni tanto i terminali vengono saturati ma l'incremento dell'esecuzione da parte dei satelliti fa crollare nuovamente lo stimolo.

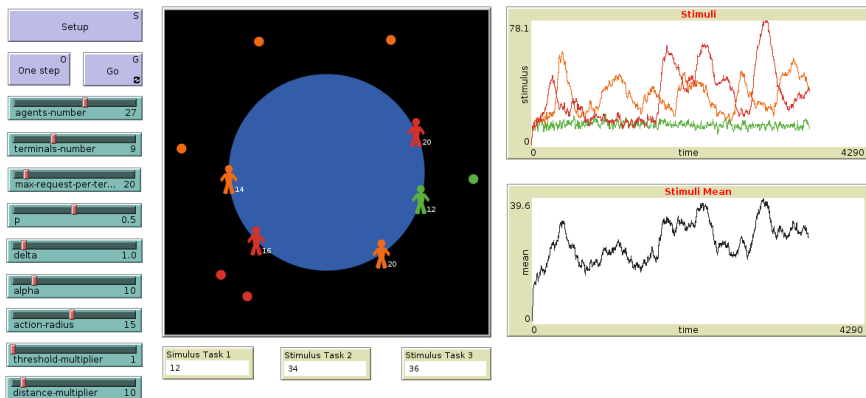


Aumentando il moltiplicatore della distanza (da 10 a 60) nella funzione $T_{\theta_{i,j}}(s_j)$ si aggiunge maggior peso alla distanza tra il satellite i e la sorgente più vicina della task j . Questo significa che sarà molto più probabile per un satellite che passa vicino ad un terminale di eseguire la task che esso richiede, aumentando la precisione e reattività della rete. Nell'immagine è infatti visibile come la media di tutti gli stimoli rimanga stabile nel tempo, ovvero la rete riesce

a bilanciare bene il soddisfacimento dello stimolo totale, grazie alla maggior precisione con cui un satellite soddisfa un terminale.



Infine cambiando manualmente da codice la velocità con cui si muovono i satelliti e impostandola alla stessa con cui si muove la terra, si mostra lo scenario del sistema di internet satellitare attuale. In questo caso, non contemplato dal modello implementato perchè non conforme alla configurazione di StarLink, è possibile vedere come ogni satellite si occupi di un singolo terminale nel tempo, cambiando difficilmente task da eseguire, in quanto la distanza dai terminali rimane fissa. La Task 1 (verde) ad esempio, viene soddisfatta perfettamente dai satelliti adiacenti raggiungendo un certo equilibrio.



4 Conclusioni

Varie altre osservazioni possono essere fatte visualizzando in tempo reale l'esecuzione e modificandone i parametri. Per l'analisi effettuata il modello risulta del tutto conforme al fenomeno studiato.

Rappresenta una versione fedele della condivisione del lavoro e allocazione delle attività in un ambiente dinamico, nello specifico della rete internet satellitare StarLink. Il comportamento dei satelliti in relazione alle attività dei terminali è prevedibile grazie alla corretta modellazione fatta.

Possibili estensioni possono includere un layer superiore di satelliti che orbitano ad una velocità inferiore attorno alla terra, e "servono" il layer di satelliti sottostante.

5 Referenze

- [1] <https://www.nytimes.com/2019/06/01/science/starlink-spacex-astronomers.html>
- [2] <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- [3] <http://www.cs.unibo.it/~babaoglu/courses/csns/code/index.html>
- [4] <https://global.oup.com/academic/product/swarm-intelligence-9780195131598>