

Abstract

Since new products and technologies directly affect many aspects of the life of persons, communities, countries and economies, the *diffusion of innovations* appears a very important field of research. Modelling and forecasting the diffusion of innovations is a broad field of study, whose relevance is confirmed by the considerable body of research devoted to it. This research has especially called the attention on the importance of innovations in triggering the evolution of social and economic systems and on the central role played by diffusion models from a strategic and anticipative point of view.

The phenomenon of innovation diffusion is essentially a social one, but has always attracted many researchers for its interdisciplinary character, that permits to combine theories and concepts from many disciplines, such as natural sciences, mathematics, physics, statistics, social sciences, marketing science, economics, technological forecasting and technology management.

The formal representation of diffusion processes has historically used epidemic models borrowed from biology, namely the logistic or s-shape equation, under the hypothesis that an innovation spreads in a social system through communication between persons like an epidemic through contagion.

The most famous and employed evolution of this equation is the Bass model (Bass, 1969), developed in the field of *quantitative marketing* and soon become a major reference for research in innovation diffusion, due to its surprisingly simplified formal structure on one hand and its predictive power on the other. Since the publication of the Bass model in Management Science in 1969, the field of quantitative marketing has

become particularly strong in defining the boundaries and the directions of innovation diffusion theorizing and modelling. One of the characterizing aspects of the Bass model is that it addresses markets in aggregate: using aggregate adoption data it depicts and predicts the development of an innovation life cycle already in progress. In strategic terms, crucial forecasts concern the point of maximum growth of the life cycle, the peak, and the point of market saturation, when the diffusion comes to an end. The emphasis on the aggregate dimension of adoption has been criticized, observing that it does not give the right importance to the individual dimension, that is, the individual choice to adopt. Many efforts were made in the past to combine micro and macro levels of innovation diffusion, trying to reconstruct the Bass model by a specification of the individual behaviour, with limited success. A recent trend of research in this direction suggests to use Agent-Based Models, in particular Cellular Automata models for this purpose. Cellular Automata models may be defined as models that simulate global consequences on the basis of local (individual) rules of behaviour. While these models are generally implemented through computer simulations, a challenging question requires to treat Agent-Based models in a formal way that can be later generalized into an aggregate model, empirically testable with aggregate adoption data. The formal connection between these two classes of models has not yet received an explicit treatment in literature, though it seems particularly suitable for building new aggregate models that extend the structure of the Bass model, by specifying individual rules of behaviour, that is, by taking into explicit consideration the effect that individuals' heterogeneity can have on diffusion.

The thesis is structured as follows.

Chapter 1 provides a survey on innovation diffusion models, focusing on the Bass model (Bass, 1969) and the Generalized Bass model (Bass, Krishnan, Jain, 1994), their mathematical structure and some aspects of statistical implementation. Some applications of both are proposed with reference to the diffusion of a pharmaceutical drug and to energy technologies (world crude oil production, photovoltaic technology in Japan and Germany) to show the performance of these models in predictive terms. The final part of the chapter is dedicated to present possible directions of research and extensions of the Bass model, including the importance to discuss underlying assumptions of the model, like the constant value of the market potential, the need to model individual heterogeneity in adoption and the rise of networks within diffusion.

Chapter 2 introduces the problem of modelling diffusion at the individual level, indicating Cellular Automata models as a valid tool for the purpose. The result of the simulation of a simple Cellular Automata for an innovation diffusion process evidences that this class of models presents a strong connection with the aggregate approach. A formal connection is proposed in this chapter, based on a “mean field approximation”, that allows a simple and efficient reconstruction of an aggregate structure from the specification of individual rules of behaviour. The final obtained result is a differential Riccati equation, which under specific constraints reproduces the structure of the Bass model.

Chapter 3 is concerned with analysing the process of communication that underlies adoptions. It is argued that the spread of information about an innovation among the members of a social system is the necessary condition for successive adoptions, and the market potential is modelled as a function of this information process. The most important consequence in modelling terms is that the market potential is no longer

constant, but it is time dependent. The model provided is built exploiting the Cellular Automata approach and describes an innovation diffusion process in which information and adoption dynamics co-evolve. Two applications are proposed in order to test the performance of the model, to show its superiority with respect to the Bass model in forecasting terms and to suggest its potential application to managerial evaluations on the effect of communication efforts on diffusion.

Chapter 4 is dedicated to discuss a modification of the model proposed in 3 in order to take into account the penalizing effect of network externalities on adoptions of interactive innovations, like telephones, fax machines, etc. Given that the Bass model does not provide a clear explanation of this phenomenon, a model able to take into account their effect would be certainly desirable. A diffusion model incorporating network externalities is proposed as a perspective of future research. Other proposals for further investigations are discussed in the final section of this chapter, summarizing the research path realized, highlighting results and limitations, suggesting likely improvements and potential connections with other topics of study.

Prefazione

Lo studio dei processi di diffusione delle innovazioni appare un tema di centrale importanza, dal momento che prodotti e tecnologie innovative coinvolgono molteplici aspetti della vita delle persone, dei paesi, della società e dell'economia.

La modellazione e la previsione di processi di diffusione delle innovazioni rappresentano un'ampia area di ricerca, il cui rilievo è confermato dall'imponente produzione di articoli e pubblicazioni a riguardo. Tale ricerca ha generalmente richiamato l'attenzione da un lato sull'importanza delle innovazioni come stimolo all'evoluzione di sistemi economici e sociali, dall'altro sul ruolo dei modelli di diffusione da un punto di vista strategico e previsivo.

La diffusione di un'innovazione è un fenomeno di natura essenzialmente sociale: tuttavia esso ha sempre attratto l'attenzione di molti studiosi per il suo carattere interdisciplinare, che permette di combinare ed integrare teorie e concetti provenienti da discipline molto diverse, come le scienze naturali, la matematica, la fisica, la statistica, le scienze sociali, l'economia, il marketing, il management, la predizione tecnologica.

La rappresentazione formale dei processi di diffusione si è storicamente avvalsa dei modelli epidemici presi a prestito dalla biologia, tipicamente l'equazione logistica, dietro l'ipotesi che un'innovazione si diffonda in un sistema sociale attraverso il meccanismo della comunicazione, in modo simile a come un'epidemia si diffonde attraverso il contagio fra persone.

La più famosa ed utilizzata evoluzione dell'equazione logistica è il modello di Bass (Bass, 1969), sviluppato nell'ambito del marketing quantitativo e presto divenuto un riferimento essenziale per l'attività di ricerca sulla diffusione, grazie alla sua struttura

sorprendentemente semplice ed alla sua notevole capacità predittiva. A partire dalla pubblicazione del modello di Bass su *Management Science* nel 1969, l'ambito del marketing quantitativo ha cominciato a ricoprire una posizione di crescente importanza nel definire i contorni e gli orientamenti della teoria e della modellazione della diffusione. Uno degli aspetti caratterizzanti del modello di Bass riguarda il fatto che esso analizza il mercato nella sua dimensione aggregata: infatti, utilizzando dati aggregati di adozione, tale modello descrive e prevede lo sviluppo del ciclo di vita di una innovazione, quando questo è già iniziato. Da un punto di vista strategico, previsioni cruciali riguardano il raggiungimento del picco, ovvero del punto di massima espansione del processo di diffusione, e il punto di saturazione del mercato, quando il ciclo di vita sta per concludersi. L'enfasi sulla dimensione aggregata del processo di adozione è stata oggetto di varie critiche, dal momento che questa non consentirebbe di dare l'adeguato peso alla dimensione individuale della scelta. In passato vennero compiuti molti sforzi di ricerca allo scopo di combinare micro e macro livelli di analisi, tentando di ricostruire la struttura aggregata del modello di Bass a partire dalla specificazione del comportamento del singolo individuo, tuttavia con risultati piuttosto limitati.

Una recente prospettiva di ricerca suggerisce di utilizzare gli Agent-Based models, in particolare i Cellular Automata models, allo scopo di combinare micro e macro livelli di analisi. I Cellular Automata models possono essere definiti modelli che simulano situazioni globali a partire da regole individuali (locali) di comportamento. Se questi modelli vengono solitamente utilizzati per mezzo di simulazioni, rimane una questione ancora aperta una loro trattazione formale che ne consenta una generalizzazione aggregata, testabile empiricamente. Di fatto, l'esistenza di una connessione formale fra

l'approccio aggregato e quello Agent-Based non è ancora stata esplicitamente affrontata in letteratura: tuttavia essa appare un cruciale passaggio per la costruzione di nuovi modelli aggregati per la diffusione di innovazioni che estendano la struttura del modello di Bass, prendendo specificamente in considerazione l'effetto che l'eterogeneità individuale può avere sul processo complessivo.

La tesi è organizzata come segue.

Il Capitolo 1 è dedicato ad una rassegna sui modelli di diffusione di innovazioni, con particolare attenzione per quelli propri del marketing strategico, il modello di Bass (1969) ed il modello di Bass Generalizzato (Bass, Krishnan, Jain, 1994), la loro struttura matematica ed alcuni aspetti di implementazione statistica. Vengono proposte alcune applicazioni di entrambi i modelli relative alla diffusione di farmaci e di tecnologie energetiche allo scopo di illustrarne le caratteristiche strategiche e previsive. La parte finale del capitolo propone possibili direzioni di ricerca e di estensione del modello di Bass, mettendo in rilievo l'importanza di discutere alcune assunzioni essenziali del modello, come la costanza del mercato potenziale raggiungibile, la necessità di modellare l'eterogeneità individuale, la formazione di network all'interno del processo di diffusione.

Il Capitolo 2 introduce il problema di modellare il processo di diffusione a livello individuale, indicando i Cellular Automata models come un valido strumento a tale scopo. Il risultato di una simulazione di un processo di diffusione condotta con un semplice Cellular Automata evidenzia che questa classe di modelli è strettamente connessa al tradizionale approccio differenziale aggregato. In questo capitolo, viene proposta una relazione formale fra questi due approcci basata sulla "mean field approximation", permettendo una semplice ed efficiente ricostruzione di una struttura

aggregata a partire dalla specificazione di regole di comportamento individuale. Come risultato finale, si ottiene una equazione di Riccati, la quale, sotto opportune condizioni, riproduce la struttura del modello di Bass.

Il Capitolo 3 è dedicato all'analisi del processo di comunicazione a fondamento delle adozioni. Come premessa fondamentale, si ipotizza che la diffusione dell'informazione relativa ad un'innovazione fra i membri di un sistema sociale sia la condizione necessaria per il successivo processo di adozione ed in particolare che il mercato potenziale sia funzione di tale informazione diffusa. Rendendo il mercato potenziale funzione di un processo di comunicazione che si sviluppa nel tempo, ne consegue che esso non è più costante, ma ha una struttura dinamica. Il modello presentato in questo capitolo viene costruito sfruttando l'approccio dei Cellular Automata models e descrive un processo di diffusione di una innovazione, in cui informazione ed adozioni costituiscono due processi che co-evolvono. Vengono presentate due applicazioni allo scopo di testare la performance del nuovo modello rispetto a quello di Bass e di suggerire il suo utilizzo come strumento di valutazione dell'effetto degli strumenti di comunicazione sulla diffusione.

Il Capitolo 4 è dedicato alla discussione di una modifica del modello proposto nel Capitolo 3 allo scopo di tenere conto dell'effetto penalizzante sulle adozioni esercitato dalle esternalità di rete. Dato che il modello di Bass non considera esplicitamente tale effetto, un modello di diffusione che lo incorporasse sarebbe un interessante obiettivo di ricerca: un primo tentativo in questa direzione viene compiuto in questo capitolo. Altre proposte di ricerca vengono presentate nella parte finale del capitolo, riassumendo il percorso realizzato, i risultati raggiunti e i limiti del lavoro, suggerendo dei miglioramenti e possibili connessioni con altri temi di studio.