

PF - PROBABILITÀ E FINANZA
AA 2021/2022

INFORMAZIONI E PROGRAMMA DEL CORSO
UNIVERSITÀ DI ROMA “TOR VERGATA”
CORSO DI LAUREA IN MATEMATICA
DOCENTE: LUCIA CARAMELLINO¹

Informazioni sul corso

Prerequisiti

Per una buona preparazione all’esame è consigliato il corso Probabilità e statistica del II anno di Laurea Triennale.

Modalità d’esame

L’esame consiste in una prova orale, che comprende anche una discussione sugli algoritmi di simulazione analizzati durante il corso. Gli studenti devono obbligatoriamente prenotarsi all’esame alla pagina ServiziOnLine (Deplhi) di Tor Vergata. I programmi con l’implementazione degli esercizi vanno consegnati al docente prima della data d’esame (su supporto elettronico, da consegnare a mano, oppure via e-mail a caramell@mat.uniroma2.it; qui di seguito sono elencati tutti gli esercizi richiesti). Si fa esplicita richiesta di utilizzare un linguaggio di programmazione (ad es. C, C++, Pascal etc., ma non Scilab o analoghi software), a scelta dello studente. Si richiede la consegna dei file sorgente e, nel caso di grafici, di file salvati in pdf. Gli studenti possono lavorare in gruppo. Prima della data d’esame (o meglio, della data del primo del gruppo che sosterrà l’esame), sarà preso un appuntamento dove gli studenti che hanno consegnato i programmi illustreranno al docente gli stessi.

Testi consigliati

- L. Caramellino *Numeri e dollari: probabilità e finanza*. Conferenza ScienzaOrienta.
- P. Baldi, L. Caramellino: *Appunti del corso Probabilità e Finanza*.
- A. Pascucci, W.J. Runggaldier: *Finanza matematica. Teoria e problemi per modelli multiperiodali*. Springer Universitext, 2009.
- P. Glasserman: *Monte Carlo methods in financial engineering*. Springer-Verlag, 2004.

Il testo della conferenza e gli appunti sono scaricabili dal canale Teams del corso oppure si possono richiedere via email all’indirizzo caramell@mat.uniroma2.it

¹Dipartimento di Matematica, Università di Roma “Tor Vergata”, email: caramell@mat.uniroma2.it; web: www.mat.uniroma2.it/~caramell

Programma

Introduzione alla finanza

Tassi di interesse. Alcuni aspetti dei mercati finanziari: la vendita allo scoperto; l'arbitraggio; le ipotesi di mercato. Prodotti derivati. Le opzioni di acquisto (call) e di vendita (put). Le opzioni come strumenti finanziari per la gestione dei rischi. Il payoff dell'opzione call/put. Il problema del prezzo e della copertura dell'opzione.

[cfr. Appunti, Cap 1; conferenza ScienzaOrienta]

[cfr. Conferenza ScienzaOrienta "Numeri e dollari: probabilità e finanza"]

PARTE I. Probabilità

Cenni di teoria della misura: σ -algebre e funzioni misurabili

Richiami di probabilità: le algebre e le σ -algebre. La σ -algebra generata da una classe di sottoinsiemi. Esempi: $\sigma(\mathcal{C}) = \mathcal{C}$ quando \mathcal{C} è una σ -algebra; $\sigma(\mathcal{C}_1) \subset \sigma(\mathcal{C}_2)$ quando $\mathcal{C}_1 \subset \mathcal{C}_2$. La σ -algebra generata da una partizione al più numerabile. La σ -algebra di Borel. Le classi generatrici di $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ (intervalli aperti, semichiusi, chiusi, etc.). La classe $\pi(\mathbb{R}) = \{(-\infty, c] : c \in \mathbb{R}\}$ come classe che genera $\mathcal{B}(\mathbb{R})$. Spazi misurabili e funzioni misurabili. La σ -algebra generata da una funzione misurabile e la sua caratterizzazione in termini di controimmagini. Condizioni sufficienti per la verifica della misurabilità. Caso particolare per funzioni a valori reali. Funzioni discrete: definizione, misurabilità, la σ -algebra generata come una σ -algebra generata da una partizione numerabile. Proprietà delle funzioni misurabili: la classe delle funzioni misurabili come un'algebra; misurabilità della funzione composta di funzioni misurabili; misurabilità dell'inf, del sup etc. di una successione di funzioni misurabili; $\sigma(f) = \sigma(g)$ quando $f = h_1 \circ g$ e $g = h_2 \circ f$, con f, g, h_1, h_2 misurabili; data una partizione \mathcal{C} al più numerabile, se f è $\sigma(\mathcal{C})$ -misurabile allora f è costante su tutti gli elementi della partizione. Date due funzioni \mathcal{S} -misurabili f e g , se g è $\sigma(f)$ -misurabile allora $g = h \circ f$, per un'opportuna funzione misurabile h [s.d.].

[cfr. Appunti, Par. 2.1]

Spazi di probabilità e variabili aleatorie

Definizione di uno spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$. Caso particolare: quando $\mathcal{F} = \sigma(\mathcal{C})$ con \mathcal{C} partizione al più numerabile di Ω allora \mathbb{P} è perfettamente individuata dai valori $\mathbb{P}(C)$, al variare di $C \in \mathcal{C}$. Le proprietà generali della probabilità \mathbb{P} e la proprietà di monotonia. Indipendenza tra eventi, legame con la proprietà di fattorizzazione delle σ -algebre generate da questi eventi. La definizione di σ -algebre indipendenti. Caso particolare: quando le σ -algebre sono generate da partizioni al più numerabili basta che la proprietà di fattorizzazione valga per elementi scelti nelle partizioni. Le variabili aleatorie (v.a.) come funzioni misurabili. La definizione di v.a. indipendenti in termini delle σ -algebre generate. Definizione di indipendenza tra v.a. e σ -algebre. Le proprietà delle v.a. Richiami dal corso dei probabilità del II anno: v.a. discrete e assolutamente continue (legge congiunta, leggi marginali), caratterizzazione dell'indipendenza in termini di densità; densità

discreta condizionale; la speranza matematica per v.a. discrete o a.c. e le sue proprietà. Caso particolare: la media di una v.a. discreta come somma pesata su Ω (e non sullo spazio di arrivo). Ancora richiami: momento k -esimo e momento k -esimo centrato; spazi $L^p(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, $p \geq 1$, e l'inclusione $L^p \subset L^q$ quando $p \geq q \geq 1$; lo spazio L^2 e la varianza; le disuguaglianze di Markov, di Chebycev, di Schwarz; richiami sulla covarianza e varianza della somma di v.a.; speranza matematica di un vettore aleatorio.

[cfr. Appunti, Par. 2.3]

La speranza condizionale

Speranza matematica condizionale: $\mathbb{E}(X | Y)$ quando (X, Y) è un vettore aleatorio discreto e $\mathbb{E}(X | \mathcal{G})$ quando \mathcal{G} è una σ -algebra generata da una partizione al più numerabile di Ω . Definizione formale di $\mathbb{E}(X | \mathcal{G})$. Caso particolare: quando $\mathcal{G} = \sigma(Y)$, quindi $\mathbb{E}(X | \mathcal{G}) = \mathbb{E}(X | Y) = \Psi_X(Y)$, con Ψ_X funzione boreliana. Il formalismo “ $\mathbb{E}(X | Y = y)$ ”. Calcolo esplicito della funzione Ψ_X quando X e Y hanno densità congiunta discreta oppure hanno densità congiunta continua, in quest'ultimo caso definizione di “densità continua condizionale”. Le proprietà della media condizionale: se $X = c$ q.c. allora $\mathbb{E}(X | \mathcal{G}) = c$ q.c.; $\mathbb{E}(\mathbb{E}(X | \mathcal{G})) = \mathbb{E}(X)$; linearità, positività e monotonia della media condizionale; la disuguaglianza di Jensen per la media e per la media condizionale; se X è \mathcal{G} -misurabile allora $\mathbb{E}(XY | \mathcal{G}) = X\mathbb{E}(Y | \mathcal{G})$; se $\mathcal{A} \subset \mathcal{G}$ sotto σ -algebre di \mathcal{F} allora $\mathbb{E}(X | \mathcal{A}) = \mathbb{E}(\mathbb{E}(X | \mathcal{A}) | \mathcal{G}) = \mathbb{E}(\mathbb{E}(X | \mathcal{G}) | \mathcal{A})$; se $X \perp\!\!\!\perp \mathcal{G}$ allora $\mathbb{E}(X | \mathcal{G}) = \mathbb{E}(X)$; se X è \mathcal{G} -misurabile e $Y \perp\!\!\!\perp \mathcal{G}$ allora $\mathbb{E}(f(X, Y) | \mathcal{G}) = \mathbb{E}(f(x, Y))|_{x=X}$; se X è di quadrato integrabile allora $\mathbb{E}((X - \mathbb{E}(X | \mathcal{G}))^2) \leq \mathbb{E}((X - Z)^2)$ per ogni v.a. Z di quadrato integrabile e \mathcal{G} -misurabile.

[cfr. Appunti, Par. 3.1]

Martingale, tempi d'arresto

Filtrazioni, processi adattati a tempo discreto. Definizione di martingala (mg), supermartingala (supermg) e submartingala (submg). Se $(X_n)_n$ è una martingala (risp. supermg, submg) allora $\{\mathbb{E}(X_n)\}_n$ è una successione costante (risp. non crescente, non decrescente). Proprietà delle martingale, submartingale e supermartingale. La decomposizione di Doob ed il compensatore. Le martingale trasformate. Tempi d'arresto e σ -algebra degli eventi antecedenti: definizioni e definizioni equivalenti. Proprietà dei tempi d'arresto, ad esempio: il tempo di ingresso/di uscita di un processo adattato è un tempo d'arresto; se τ_1 e τ_2 sono \mathcal{F}_n -t.a. allora $\tau_1 \wedge \tau_2$ è un \mathcal{F}_n -t.a.; se τ_1 e τ_2 sono \mathcal{F}_n -t.a. tali che $\tau_1 \leq \tau_2$ allora $\mathcal{F}_{\tau_1} \subset \mathcal{F}_{\tau_2}$; se τ_1 e τ_2 sono \mathcal{F}_n -t.a. allora $\mathcal{F}_{\tau_1 \wedge \tau_2} = \mathcal{F}_{\tau_1} \cap \mathcal{F}_{\tau_2}$; se $(X_n)_n$ è un processo \mathcal{F}_n -adattato e τ è un \mathcal{F}_n -t.a. finito allora X_τ è una v.a. \mathcal{F}_τ -misurabile. Il processo arrestato $X_n^\tau = X_{\tau \wedge n}$: se $(X_n)_n$ è una \mathcal{F}_n -mg (risp. submg, supermg) e τ è un \mathcal{F}_n -t.a. allora $(X_n^\tau)_n$ rimane una \mathcal{F}_n -mg (risp. submg, supermg). La decomposizione di Doob per le submg o supermg arrestate. Il teorema d'arresto.

[cfr. Appunti, Par. 3.2, 3.3]

Parte II. Modelli discreti per la finanza

Opzioni europee

Il modello discreto per la descrizione dei mercati finanziari: la filtrazione, il processo $d+1$ -dimensionale dei prezzi, il fattore di sconto ed il processo dei prezzi scontati. Strategie di gestione e portafoglio associato. Strategie autofinanzianti e caratterizzazione in termini di scrittura del portafoglio e del portafoglio scontato. Dati un processo predicibile $(\phi_n^1, \dots, \phi_n^d)_n$ a valori in \mathbb{R}^d e $V_0 \in \mathbb{R}$ esiste un unico processo predicibile $(\phi_n^0)_n$ tale che $(\phi_n^0, \phi_n^1, \dots, \phi_n^d)_n$ sia una strategia ammissibile. Il primo teorema fondamentale dell'asset pricing (s.d. il Lemma 4.4.3). Conseguenze dell'esistenza della misura di martingala equivalente, ad esempio la formula di parità call-put. Mancanza di arbitraggio nel modello binomiale e del modello trinomiale ad un periodo: studio dell'esistenza della misura di martingala equivalente ed eventuale unicità. Definizione formale di un'opzione europea. Esempi: opzioni call, put, digital, asiatiche, con barriere. Opzioni replicabili e prezzo "di non arbitraggio". Completezza del mercato. Il secondo teorema fondamentale dell'asset pricing. Esempio: in mancanza di arbitraggio, il modello binomiale ad un periodo è completo ma il modello trinomiale ad un periodo non lo è. La formula di parità call-put con l'uso esplicito del prezzo (portafoglio replicante). Il modello di Cox, Ross e Rubinstein (CRR): definizione, proprietà. Equivalenza tra mancanza di arbitraggio e la condizione $a < r < b$. Completezza del mercato. Formula esplicita del prezzo di un'opzione di payoff $h = F(S_N)$. Calcolo della strategia replicante per opzioni di payoff $h = F(S_N)$. Formula *backward* del prezzo. Uso pratico del modello CRR: suddivisione dell'intervallo $[0, T]$ in N sottointervalli, scelta del tasso ($r_N = RT/N$) e dei salti ($1 + a_N = (1 + r_N)e^{-\sigma\sqrt{T/N}}$ e $1 + b_N = (1 + r_N)e^{\sigma\sqrt{T/N}}$) in modo da costruire un mercato completo. La volatilità $\sigma > 0$. Convergenza in legge, per $N \rightarrow \infty$, di $\log \tilde{S}_N^N/S_0$ ad una normale di media $-\sigma^2 T/2$ e varianza $\sigma^2 T$ [s.d.]. Le formule di Black e Scholes per il prezzo della call e della put come limite, per $N \rightarrow \infty$, del valore della call e della put nel modello CRR. Studio empirico (in scala logaritmica) della convergenza e metodo di estrapolazione di Romberg per determinare una successione che converge più velocemente. Prezzo Black e Scholes di call/put come funzione crescente del parametro volatilità - interpretazione finanziaria.

Programmi da consegnare inerenti a questi argomenti:

- studio empirico della velocità di convergenza del prezzo CRR al prezzo Black e Scholes della call e della put (Esercizio 4.1).

[cfr. Appunti, Cap. 4]

Opzioni americane nei mercati completi

Opzioni americane nel modello generale, in ipotesi di completezza del mercato. Il processo-payoff. La formulazione "all'indietro" del prezzo dell'opzione americana (principio di programmazione dinamica). Payoff e prezzo scontati: formulazione "all'indietro" del prezzo scontato dell'opzione americana in termini del processo di payoff scontato. Il prezzo scontato dell'opzione americana come l'inviluppo di Snell del processo di payoff scontato. Il

tempo $\nu_0 = \inf\{n \geq 0 : \tilde{U}_n = \tilde{Z}_n\}$: proprietà di martingala per $(\tilde{U}_n^{\nu_0})_{0 \leq n \leq N}$. Dimostrazione della proprietà $U_0 = \sup_{\nu \in \mathcal{T}_{0,N}} \mathbb{E}^*(\tilde{Z}_\nu)$ e ottimalità di ν_0 ($U_0 = \mathbb{E}^*(\tilde{Z}_{\nu_0})$). Definizione formale di “istante di esercizio ottimale” e caratterizzazione matematica [s.d.]. Uso della decomposizione di Doob $\tilde{U}_n = \tilde{M}_n + \tilde{A}_n$, $n \leq N$, per determinare una strategia ammissibile ϕ tale che $V_\tau(\phi) = Z_\tau$ per ogni tempo ottimale di esercizio τ (copertura esatta delle opzioni americane). Opzione europea associata e relazione tra prezzo americano e prezzo europeo. Caso dell’opzione call: uguaglianza tra prezzo americano ed europeo. La formula della funzione-prezzo della put americana nel modello CRR: versione “all’indietro” (dal principio di programmazione dinamica). Le proprietà (continuità, monotonia e convessità - s.d.) e discussione qualitativa.

Programmi da consegnare inerenti a questi argomenti:

- implementazione al calcolatore del principio di programmazione dinamica per il calcolo del prezzo della put americana nel modello CRR e disegno del grafico della funzione $x \mapsto P_{\text{am}}(0, x)$ (Esercizio 5.1).

[cfr. Appunti, Cap. 5]

Parte III. Metodi numerici per la finanza

Il metodo Monte Carlo

Metodi Monte Carlo: generalità. L’intervallo di fiducia come output standard. Applicazione: calcolo del prezzo di opzioni nel modello CRR. Simulazione del modello CRR. Stima del prezzo di call/put standard con il metodo Monte Carlo e studio empirico della velocità di convergenza al valore esatto quando il numero di simulazioni tende a $+\infty$. Opzioni asiatiche: prezzo di call/put asiatiche con la tecnica Monte Carlo. Confronto con il prezzo della call/put standard. Formule di parità per il prezzo dell’opzione call/put asiatica ed uso per la validazione del programma. Opzioni con barriere ((up,down)&(in,out), double&(in,out)): calcolo del prezzo con metodi Monte Carlo. Formule di parità per la validazione del programma. Copertura dinamica per opzioni europee.

Put americana: simulazione del tempo ottimale di esercizio ν_0 . Copertura dinamica della put americana: il portafoglio che replica esattamente il payoff americano nell’istante di esercizio ν_0 .

[cfr. Appunti, Cap. 6]

Programmi da consegnare inerenti a questi argomenti:

- calcolo numerico con il metodo Monte Carlo del prezzo di:
 - call/put standard, con studio empirico della convergenza ai risultati forniti dalle formule esatte quando il numero di simulazioni Q tende a $+\infty$ (Esercizio 6.1);
 - call/put asiatica, e uso delle formule di parità per la validazione del programma (Esercizio 6.2);

- call/put con barriere, e uso delle formule di parità per la validazione del programma (Esercizio 6.3);
- copertura dinamica per una call europea, usando le formule esatte (Esercizio 6.4).