

Recenzenti: Doc. RNDr. Zuzana Prášková, CSc.
Doc. RNDr. Karel Zvára, CSc.

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této knihy nesmí být reprodukována žádnou formou, elektronickým, optickým, audio, mechanickým či jiným způsobem, včetně systémů na ukládání a vyhledávání informací, bez písemného souhlasu vydavatele. Neoprávněné užití této knihy bude trestně stíháno.

Finanční ekonometrie

Tomáš Cipra

2., upravené vydání, 2013

Vydalo nakladatelství Ekopress, s. r. o.
K Mostu 124, Praha 4

Odpovědná redaktorka Iva Kapcová
Sazba autor
Obálka Karel Novák

Tisk Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

www.ekopress.cz

© Prof. RNDr. Tomáš Cipra, DrSc., 2008, 2013
© Ekopress, s. r. o., 2008, 2013

ISBN 978-80-86929-93-4

OBSAH

SEZNAM NĚKTERÝCH SYMBOLŮ	11
1. ÚVOD	17
2. PŘEDMĚT FINANČNÍ EKONOMETRIE	21
2.1. Konstrukce ekonometrického modelu	24
2.2. Typy dat	26
2.3. Míry zisku	27
2.4. Finanční ekonometrický software	29
3. KLASICKÝ MODEL LINEÁRNÍ REGRESE	31
3.1. Motivace	31
3.2. Metoda nejmenších čtverců	34
3.3. Vlastnosti odhadu metodou nejmenších čtverců	40
3.3.1. Nestrannost odhadu	45
3.3.2. Konzistence odhadu	46
3.3.3. Eficiencie odhadu	47
3.3.4. Asymptotické vlastnosti odhadu	47
3.4. Koeficient determinace	48
3.5. Normální model	52
3.6. Testování hypotéz	54
3.6.1. Principy testování hypotéz	55
3.6.2. Testování normality	57
3.6.3. Testy pro jednotlivé parametry	60
3.6.4. Souhrnné testy pro více parametrů	63
3.6.5. Předpovědi	70
3.7. Kvalitativní vysvětlující proměnné	73
3.8. Příklad: model pro oceňování realit	76
3.9. Úlohy	80

4. EKONOMETRICKÁ ZOBECNĚNÍ LINEÁRNÍ REGRESE	81
4.1. Zobecněný model lineární regrese	82
4.2. Heteroskedasticita	84
4.2.1. Detekce heteroskedasticity	85
4.2.2. Důsledky heteroskedasticity	87
4.2.3. Řešení heteroskedasticity	87
4.3. Autokorelovanost reziduí	94
4.3.1. Detekce autokorelovanosti reziduí	95
4.3.2. Důsledky autokorelovanosti reziduí	100
4.3.3. Řešení autokorelovanosti reziduí	101
4.4. Dynamické modely	105
4.4.1. Lineární regresní model s autokorelovanými reziduí	107
4.4.2. Model rozložených časových zpoždění	109
4.4.3. Náhodné regresory	114
4.5. Multikolinearita	117
4.6. Specifikace modelu	121
4.6.1. Nevhodný funkcionální tvar modelu	121
4.6.2. Nezařazení relevantních vysvětlujících proměnných	124
4.6.3. Zařazení irelevantních vysvětlujících proměnných	125
4.6.4. Kritéria pro výběr modelu	126
4.6.4.1. Informační kritéria	127
4.6.4.2. Předpovědní kritéria	127
4.6.4.3. Iterační selekční metody	128
4.6.5. Transformace proměnných	129
4.7. Stabilita modelu	130
4.7.1. Rekurentní metoda nejmenších čtverců	130
4.7.2. Testy stability	131
4.7.2.1. CUSUM testy	132
4.7.2.2. Chowovy testy	133
4.8. Úlohy	138
5. SPECIÁLNÍ REGRESNÍ PROBLÉMY V EKONOMETRII	139
5.1. Testování nevnořených hypotéz	139
5.2. Nelineární regrese	142
5.3. Různé metody odhadu v regresním modelu	147
5.3.1. Dvoustupňový odhad metodou nejmenších čtverců	147
5.3.2. Maximálně věrohodný odhad	152
5.3.3. Momentový odhad	155
5.4. Modely s apriorními omezeními	158
5.5. Úlohy	164

6. DISKRÉTNÍ A OMEZENÉ VYSVĚTLOVANÉ PROMĚNNÉ	165
6.1. Binární vysvětlovaná proměnná	166
6.2. Ordinální vysvětlovaná proměnná	171
6.3. Cenzorovaná vysvětlovaná proměnná	175
6.4. Useknutá vysvětlovaná proměnná	180
6.5. Vysvětlovaná proměnná vyjadřující dobu trvání	182
6.6. Čítací vysvětlovaná proměnná	185
6.7. Úlohy	189
7. VÍCEROVNICOVÉ EKONOMETRICKÉ SOUSTAVY	191
7.1. Obecná formulace soustavy	191
7.2. SUR soustava	193
7.3. Panelová data	199
7.3.1. Panelový model s fixními efekty	200
7.3.2. Panelový model s náhodnými efekty	202
7.4. Soustava simultánních rovnic	204
7.4.1. Vychýlení v důsledku simultánního modelování	206
7.4.2. Odhady soustavy simultánních rovnic	209
7.4.2.1. Nepřímý odhad metodou nejmenších čtverců	210
7.4.2.2. Dvoustupňový odhad metodou nejmenších čtverců	216
7.4.2.3. Třístupňový odhad metodou nejmenších čtverců	217
7.4.2.4. Testy exogenity	220
7.4.3. Dynamická soustava simultánních rovnic	220
7.5. Úlohy	225
8. NÁHODNÉ PROCESY V EKONOMETRII	227
8.1. Náhodné procesy jako modely časových řad	227
8.2. Specifické problémy analýzy časových řad	228
8.2.1. Problémy časových ekonomických a finančních dat	229
8.2.2. Metodické problémy	231
8.2.3. Problémy konstrukce předpovědí	237
8.3. Náhodné procesy s diskrétními stavy v diskrétním čase	248
8.4. Náhodné procesy s diskrétními stavy ve spojitém čase	252
8.5. Náhodné procesy se spojitými stavy ve spojitém čase	255
8.6. Úlohy	256
9. DEKOMOZIČNÍ METODY PRO JEDNOROZMĚRNÉ ČASOVÉ ŘADY	257
9.1. Trend v časové řadě	258
9.1.1. Subjektivní metody eliminace trendu	258
9.1.2. Popis trendu matematickými křivkami	259
9.2. Metoda klouzavých průměrů	274

9.2.1. Konstrukce klouzavých průměrů vyrovnáváním úseků řady polynomickými křivkami	275
9.2.2. Další typy klouzavých průměrů	285
9.3. Exponenciální vyrovnávání	288
9.3.1. Jednoduché exponenciální vyrovnávání	288
9.3.2. Dvojitě exponenciální vyrovnávání	292
9.3.3. Holtova metoda	295
9.4. Sezónnost v časové řadě	298
9.4.1. Jednoduché přístupy k sezónnosti	299
9.4.2. Regresní přístupy k sezónnosti	302
9.4.3. Holtova-Wintersova metoda	305
9.4.4. Schlichtova metoda	309
9.5. Testování periodicity	311
9.6. Transformace časových řad	315
9.7. Testování náhodnosti	320
9.8. Úlohy	325
10. AUTOKORELAČNÍ METODY PRO JEDNOROZMĚRNÉ ČASOVÉ ŘADY	327
10.1. Autokorelační vlastnosti časových řad	328
10.2. Základní modely Boxovy-Jenkinsovy metodologie	332
10.3. Konstrukce modelů Boxovy-Jenkinsovy metodologie	339
10.3.1. Identifikace modelu	339
10.3.2. Odhad modelu	343
10.3.3. Diagnostika modelu	347
10.4. Stochastické modelování trendu	351
10.4.1. Testy na jednotkový kořen	353
10.4.2. Proces ARIMA	359
10.5. Stochastické modelování sezónnosti	362
10.6. Předpovědi v rámci Boxovy-Jenkinsovy metodologie	366
10.7. Autoregresní model rozložených časových zpoždění	371
10.8. Proces s dlouhou pamětí	374
10.9. Úlohy	376
11. FINANČNÍ ČASOVÉ ŘADY	377
11.1. Obecná klasifikace nelineárních modelů časových řad	377
11.2. Modelování volatility	379
11.2.1. Historická volatilita a modely EWMA	380
11.2.2. Implikovaná volatilita	383
11.2.3. Autoregresní modely volatility	384
11.2.4. ARCH modely	384

11.2.5. GARCH modely	390
11.2.6. Různé modifikace typu GARCH	394
11.3. Modely nelineární ve střední hodnotě	402
11.4. Další modely finančních časových řad	410
11.5. Testy nelinearity	413
11.6. Modelování durace	415
11.7. Úlohy	418
12. VÍCEROZMĚRNÉ ČASOVÉ ŘADY	419
12.1. Zobecnění metod pro jednorozměrné řady	419
12.2. Vektorová autoregrese VAR	426
12.3. Testování příčinnosti	439
12.4. Odezva na impuls a rozklad rozptylu	441
12.5. Kointegrace a EC model	445
12.6. Vícerozměrné modelování volatility	457
12.6.1. Vícerozměrné modely EWMA	458
12.6.2. Implikovaná vzájemná volatilita	458
12.6.3. Vícerozměrné GARCH modely	459
12.6.4. Kopula	461
12.7. Kalmanův filtr	462
12.8. Úlohy	468
13. MODELOVÁNÍ VÝVOJE FINANČNÍCH AKTIV	469
13.1. Finanční modely ve spojitém čase	469
13.1.1. Difuzní proces	470
13.1.2. Itoovo lemma a náhodný integrál	472
13.1.3. Exponenciální Wienerův proces	473
13.2. Blackův-Scholesův vzorec	476
13.3. Modelování časové struktury úrokových měr	479
14. HODNOTA V RIZIKU	483
14.1. Typy finančních rizik	483
14.2. Princip VaR	487
14.3. Výpočet VaR	492
14.4. Úvěrové riziko	501
14.5. Úlohy	506
LITERATURA	507
REJSTŘÍK	519

1. ÚVOD

Termín *finanční ekonometrie* se dnes používá pro jakoukoli *kvantitativní analýzu finančních dat* jak na mikroekonomické, tak na makroekonomické úrovni. Přitom kvantitativní analýzou se míní především statistické zpracování finančních dat (tj. klasická popisná statistická analýza, statistická identifikace, odhad a verifikace příslušného modelu, statistické testování různých finančních hypotéz a konstrukce předpovědí v rámci zkonstruovaného modelu) s využitím dostupných ekonomických informací a pak následná diskuse získaných výsledků z hlediska jejich kompatibility s praxí a dopadu v rámci dané finanční reality (finančních trhů, finančního sektoru, burzy, banky, investiční firmy, penzijního fondu apod.). Významné je také propojení finanční ekonometrie s klasickou *finanční matematikou*, která pro kalibrování svých modelů pro daný trh (např. při modelování časové struktury úrokových měr či úvěrového rizika, při oceňování kapitálu v rámci modelu CAPM apod.), ratingu a klastrování finančních ukazatelů a v celé řadě dalších oblastí musí při konkrétních výpočtech používat ekonometrické metody (to platí do jisté míry i pro *pojistnou matematiku*).

Vedle termínu finanční ekonometrie se také často používají spojení typu *ekonometrická analýza finančních dat*, *ekonometrie finančních trhů*, *analýza finančních časových řad* apod. (viz také názvy některých monografií a článků v uvedené bibliografii). Takový přístup si vyžádala praxe, neboť podle některých pramenů až devadesát procent z objemu dat, která prakticky zpracovává současná ekonometrie, má finanční charakter. Navíc se také stalo tolerovaným zvykem, že pokud analyzovaná data mají finanční charakter, nemluví se o statistické analýze, ale automaticky o analýze ekonometrické. Zdrojem dat pro finanční ekonometrii jsou profesionální finanční agentury (Bloomberg, Center for Research in Security Prices CRSP, DataStream, Reuters aj.), nadnárodní finanční instituce (Mezinárodní měnový fond IMF, Světová banka WB aj.), statistické úřady, centrální banky, finanční burzy jednotlivých zemí, finanční databáze spravované různými investičními společnostmi (např. u nás Patria Finance aj.), bankami, americkými univerzitami apod., ale také např. pojišťovny a zajišťovny, penzijní fondy, jednotliví obchodníci s cennými papíry, auditorské, poradenské, účetní a realitní firmy a mnoho dalších.

Důležitou součástí finanční ekonometrie je *analýza finančních časových řad*, která se soustřeďuje na dynamiku finančních jevů. V jejím rámci je nutné se vyrovnat s moderním specifíkem finančních dat, který byl zcela neznámý v klasické ekonometrii, totiž s vysokou hustotou záznamu (např. každých pět minut přes široké portfolio cenných papírů obchodovaných na burze), takže se mluví o tzv. *vysokofrekvenčních datech* předtím běžných především v technických a biologických disciplínách.

Tato publikace si klade za cíl představit postupy, které lze v rámci současné finanční ekonometrie použít. Kromě (vícerovnicových) regresních modelů je značná pozornost věnována dynamickým modelům (např. vícerozměrným autoregresním modelům VAR nebo kointegraci) včetně analýzy finančních časových řad. Poněkud netypicky jsou do tohoto ekonometrického textu zařazeny partie týkající se kreditního rizika a hodnoty v riziku *VaR* pro jejich význam v současných praktických financích. Vzhledem k rozsahu celé problematiky ovšem není možné v monografii uvádět teoretické detaily a kompletní důkazy všech tvrzení, což se řeší v rámci specializované literatury (teoretické záležitosti jsou často odsunuty do poznámek, jejichž vynecháním se nenaruší kontext výkladu). Na druhé straně by publikace měla poskytnout úplné návody pro praktické použití jednotlivých metod ve finanční praxi. K tomu účelu také slouží řada numerických příkladů především z finanční (včetně pojistné) oblasti doplněných většinou o interpretaci a diskusi získaných výsledků.

Většinu praktických výpočtů v rámci finanční ekonometrie se doporučuje provádět s využitím vhodného softwaru, a to přinejmenším z následujících důvodů: (1) programování některých metod by bylo neúnosné a v řadě případů pro nepočítačově orientovaného čtenáře vůbec neakceptovatelné; (2) software bývá většinou doplněn manuálem se stručným a výstižným popisem metody, která nás právě zajímá (navíc často bývají parametry programu nastaveny na defaultní hodnoty tak, že jsou okamžitě vhodné pro rutinní použití); (3) při zkoumání nabídky v menu programového systému někdy uživatel objeví další metody nebo modifikace známých metod, o kterých původně neměl tušení. Na druhé straně je ovšem softwarový spotřebitel vydán často zcela napospas zvolenému produktu a všem jeho možným nedostatkům (případným chybám, subjektivně dané nabídce, neprůhlednosti používaných metod aj.). Pro příklady v této publikaci byl použit software EViews 5.1 (od firmy Quantitative Micro Software QMS, i když v době publikace této knihy budou jistě dostupné vyšší verze tohoto produktu), neboť je velmi „uživatelsky přátelský“, je používán na řadě odborných pracovišť v České republice a zcela postačuje pro numerickou prezentaci většiny materiálů obsaženého v publikaci. Jako zdroje datového materiálu pro příklady byly použity webové stránky www.cnb.cz (ČNB: systém časových řad ARAD), www.czso.cz (ČSÚ), www.economic-magic.com a webové stránky související s publikací Greene (2003).

Prvoučelově je publikace určena jako vysokoškolský text pro školy ekonomického a matematického zaměření, a to včetně výzkumu, který zde probíhá. Může však být užitečná pro všechny, kteří v rámci své profese musí kvantitativně analyzovat ekonomická a finanční data.

Za pomoc poskytnutou různou formou při práci na této publikaci autor děkuje prof. J. Andělovi, prof. J. Antochovi, prof. J. Hanouskovi, Mgr. T. Hanzákovi, prof. M. Huškové, doc. Z. Práškové, prof. J. Štěpánovi, doc. J. Trešlovi, doc. K. Zvárovi a dalším. Práce na publikaci probíhala v rámci výzkumného záměru MSM 0021620839.