

计算技术的重要应用领域——计算金融^{*})

兰 蓉^{1,2} 徐弥榆¹ 郑守淇² 桂小林²

(西安交通大学经济与金融学院 西安710064)¹ (西安交通大学电子与信息工程学院 西安710049)²

One Main Application Area of Computing Technology——Computing Finance

LAN Rong^{1,2} XU Mi-Yu¹ ZHENG Shou-Qi² GUI Xiao-Lin²

(College of Economy and Finance¹, College of Electron and Information Engineering², Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710064)

E-mail: wu-lan@mail. xjtu. edu. cn

Abstract The progress and change in research methodology are the driving force of putting finance science forward. As a new finance research methodology, by using a lot of hardware and software necessary for high-performance computing, computational finance makes it possible to model and predict the evolution of some finance problems such as finance market simulation and security pricing. This paper discusses the composition and connotation of computational finance, analyzes the basic characters of high-performance computing, and introduces three exploration and application in computational finance researches including: security pricing and risk calculations; integrated financial product management; financial innovation and the computer-aided design of financial products.

Keywords High-performance computing, Computing finance, Security pricing, Risk management, Financial innovation

1. 前言

20世纪70年代后期 Black-Scholes 的期权定价模型出现后,复杂的数学模型处理、数值分析和大规模计算在金融中的应用越来越多。计算机开始进入金融领域,当时由于受计算机性能,如内存容量和中央处理器运算速度的限制,无法解决金融领域中的大规模和复杂性特征,特别是不断有新金融工具引入的金融创新和日益增加的市场易变性,仅用计算机实现一些简单的统计或其他数值分析。进入21世纪,随着我国加入WTO,促使我国社会主义市场经济体制的不断完善,经济中起核心作用的金融,其地位日见突出。认识和掌握越来越复杂的金融问题成为国家、企业准确、及时实现金融调控的关键。这需要有新的经济、金融问题研究思想、方法和工具。而现代计算机科学(简称计算科学)技术的发展为我们从微观和量化角度来认识金融规律,更好地进行金融决策提供了基础。

“计算科学是实现信息描述、变换自动化的一门科学”^[1]。“它是继理论科学和实验科学之后的第三类科学”^[2]。通过构造研究领域问题的数学模型和基于大量数据的模型模拟,获取对问题域规律的认知。具有代价小、实时性强、可重复等特点,可以用于不易做实验、复杂甚至还没有理论的问题的研究中。目前这种科学已被用于一些工程领域问题研究中,取得了突破性的研究成果,并形成新学科分支,如计算物理学、计算生物学、计算化学等,而将计算科学用于社会科学领域的研究还比较少。“金融和金融规划是高性能计算能获得巨大收益的应用领域”^[3]，“而并行计算在解决经济与金融方面的潜力既没有被充分强调也没有被开发。”^[3]正是在这样的基础上,我们提出计算金融研究。

计算金融的发展是与数学、金融学、计算机科学密切相关的,它包括新的建模技术,基于新的数学理论的算法的开发和

高性能计算机的使用。借助于数学模型和计算机模拟,金融分析家能更好地理解金融市场,开发处理市场不确定性的模型,在基于高性能计算的应用程序的帮助下提供可预见风险度的各种金融决策方案。由于可扩展计算机运算速度的不断提高,保证了计算机求解金融问题的能力,“计算已进化为解决经济、金融方面大规模决策问题的一个基本工具”^[4],使基于计算科学技术的金融理论、金融过程、金融决策等问题的研究方法成为当代金融学研究发展的热点。

2. 计算金融含义、发展及目前主要研究问题

“计算金融(Computing Finance)就是用计算程序实现金融模型和系统的数学方法^[3]”。我们可以将计算金融分为两部分,一是对金融参与者,通过对某个金融决策问题数学模型的构造和基于大量数据的计算,快速、准确地为投资和/或融资者提供各种符合其风险/收益需求的决策方案。二是对金融机构的。通过对不同金融市场、金融机构的模拟,实现对金融市场及机构在新技术条件支持下职能的认知,从而实现金融机构重组、灵活的金融市场营造以及及时的金融产品创新。在第一类问题研究中,国外许多金融机构、研究中心和大的财团通过构造自己的数学模型及算法来解决股票、证券及其它衍生物的风险定价等一系列问题,并为公司理财提供决策服务,成为企业发展的“秘密武器”,在预防和化解金融风险上起了很重要的作用,并形成了以咨询为主的金融服务业,目前在海外这也是一项高技术含量、高收益的行业。而关于金融市场、金融机构的模拟,主要由大的计算机公司或大学和国家相关机构联合开发,例如IBM公司实现的不同金融机构的虚拟系统,德克萨斯大学实现的股票市场模拟系统等。由于这样的系统复杂、庞大,所以系统开发工程时间长,需要不断地完善。目前这种系统正在为改变金融机构运营模式和服务方式发挥作

^{*})本文工作得到国家863项目:2001AA111081及西安交通大学基金项目“高性能计算在金融中的应用研究”的资助。兰 蓉 博士生,主要研究方向为并行计算、金融工程。

用,例如电子银行、网上证券等。两类系统中,第二类系统是第一类实现的基础,它为高层应用提供基础数据,但它们的发展可以同步进行,而且第一类应用更迫切和易于实现,成为计算金融目前研究和发展的热点。随着计算技术不断发展,计算性能不断提高和使用更加便利,计算金融的应用成果还会不断增加,其发展目标是实现两类应用一体化,在金融机构及市场实际运营的同时,作为一种服务机制,为不同金融参与者提供金融决策服务,并不断地实现业务重组、新市场、新产品的开发。

我国计算技术在金融中的应用起步较早,但发展及成果与世界发达国家还有很大差距。目前各金融机构及金融监管机构都在大力开发计算技术在业务中的应用,建立了各种业务管理信息系统及目前正在建设的客户关系信息系统,同时不同企业也将计算技术在其公司理财中的应用作为企业加强管理提高竞争力的重要一环。

3. 高性能计算——计算金融的支柱

高性能计算技术是基于多处理机和/或多计算机系统结构的计算,由于这类系统中资源的重复设置,在时间和空间上为数据计算、存贮、传输提供了并行的基础,通过各种并行应用技术,获得更高的系统性能指标。目前高性能计算主要应用于有大量资料,需要进行实时分析与控制的系统,以及那些复杂而又不能用其他手段来处理的问题中。从这个角度来说,高性能计算及应用水平是一个国家综合实力的标志,因此各国政府大力资助其研究。

20世纪90年代,美国等发达国家在高性能计算机和通信上取得了一些重要的成果。如1996年12月诞生了世界上第一台浮点运算速度峰值超过T级($1T=10^{12}$)的ASCIRED高性能计算机。预计到2003年左右,高性能计算机的速度将达到P级($1P=10^{15}$)。我国也在“863”计划等的支持下,高性能计算机取得了重大进展。国家智能计算机研究开发中心自1993年以来,相继研制出曙光-1对称型多处理机(SMP)系统、曙光-1000大规模并行处理(MPP)系统和基于机群结构的曙光-1000A及曙光-2000、曙光-2000 I 超级服务器系列百亿次高性能计算机。2001年1月研制的曙光-3000高性能服务器(面向网格),由64个计算节点、6个服务器节点组成,节点采用能力强大的4处理器SMP,全系统共包含280个处理器,运算速度达到每秒4000亿次浮点运算,内存容量160GB,硬盘容量3TB。同时国防科技大学计算机研究所从1983年研制成功我国第一台银河-1亿次巨型计算机起,先后研制成功银河-1十亿次巨型计算机、银河-Ⅱ百亿次巨型计算机和银河-1、银河-Ⅱ型全数字仿真计算机、银河小型巨型计算机。曙光和银河系列百亿次并行计算机的研制成功,缩小了我国高性能计算技术与世界水平的差距。同时国家高性能计算中心在全国不同地区的相继建立为各地区、各行业利用新研究手段解决攻关课题提供了环境。

总结金融领域研究问题具有以下三个特点:

(1)计算金融中的数据往往是大量的,经常是有干扰的,甚至可能是不完整的。这给构造模型带来了困难,为了构造一个好的模型往往需要精心设计数值算法和编写代码。同时对很多金融模型而言,大量模拟是唯一可行的方法。

(2)未来的不确定性。诸如股票、债券及其衍生工具包括远期和期权等,其未来的现金流在某种程度上说是随机变动的,很难描述,这给资产定价带来困难。特别是由于不断有金融创新,金融衍生工具的种类越来越多,而金融衍生工具定价

是计算金融中最基本的问题。如何准确、迅速地给金融工具定价,成为一个迫切需要解决的问题。

(3)竞争的金融市场环境很复杂,难以完全掌握。当前,各国金融市场日益开放,国际化、自由化、证券化,金融创新得到了飞速的发展,表外业务迅速膨胀,金融市场的稳定因素也随之增加。因此在建立模型时,要做出与实际相符的前提假设很难,要建立一个适合金融市场的模型更难。

正是在这样一个环境下,基于高性能计算技术的金融问题研究方法更显其在解决金融问题中的重要性和有效性。

4. 计算金融模型和方法的实践

计算金融包含了丰富的模型和方法体系。原有的一些理论与金融学中的模型,在金融系统研究中继续广为应用并不断赋予新的内涵的同时,一些新的理论方法与模型,如 Bertocchi et al. 和 Dupacova et al. 研究市场数据的不准确性或变动估计对定价和投资组合优化的模型、用现货市场的数据来解释和预测市场交易的非线性多代理模型、随机规划(stochastic programming)模型、模式校准(model calibration)、动态规划和二项式模型、Monte-Carlo 模拟、神经网络模型(Neural Network)等不断被引入并成为计算金融的核心;而计算金融研究的实践是以向量或并行计算机为基础的超级计算机为工具,对“不确定性”、“大容量”资料所表征的金融学问题实施高性能计算,探索并构筑新的金融学理论与应用模型,并将成熟的模型移至到互联网上或机群上,成为可方便使用的金融规划软件。这些不确定性、大容量资料所表征的金融问题,在金融相关研究中,有诸如期权定价、VaR 计算、股票价格波动的模拟等,可概括为证券定价和风险收益计算、综合风险管理、金融创新和金融产品的计算机辅助设计三大研究主题^[1]。

4.1 证券定价和风险收益计算

证券定价是计算金融中最基本的问题。金融过程中例如利率,股票价格等是用如 $dx_t = f(x_t)dt + \sigma x_t dz$ 的随机微分等式建模(x_t 是单一的金融过程),它代表了一些著名的单因素模型,如 Vasicek 模型, Cox-Ingersoll-Ross 模型或 Ornstein-Uhlenbeck 指数过程。在风险中性的情况下,公平市场价格将由现金流依据即时利率折算成的现值来决定,可表示为:

$$P = \int_0^T C(t, r_t) e^{-r_t dt} \quad (1)$$

r_t 为无风险利率, t 是时间(从0到T), $C(t, r_t)$ 是金融工具支付函数。这是个随机过程模型。随机过程模型通常用离散的网阵来近似,假定时间从 t 到 $t + \Delta t$, 过程 x_t 从开始的状态 x_t^0 到最后状态 $x_{t+\Delta}^i$, $i = 1, \dots, n$, 以概率 $\pi_{t+\Delta}^i$ 变动,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,离散网阵的过程就收敛为连续的随机过程。模型表示为:

$$P_t^\sigma = \frac{1}{S_\sigma} \sum_{s=1}^{S_\sigma} \sum_{\tau=t+\Delta}^T \frac{C(t, s)}{\Pi_{i=1}^{\tau-t} (1+r_i)} \quad (2)$$

t 从0到T, s 为可选的方案 $s = 1, 2, \dots, S$ 来区分, s 为随机过程 r_t 的函数, $C(t, s)$ 为金融工具的收益, σ 表示各个网格状态($\sigma = 1, \dots, \tau$), S_σ 表示 σ 网格的决策方案,在 τ 的末端的价格(P_t^σ),它是通过各子网阵(S_σ)的现金流的期望现值来计算^[1]。

这个模型的计算量,依据不同的金融工具而定。对于路径依赖工具,他们的价格也是路径依赖的($P_t^\sigma = P_t^\sigma(\{r_t^i\}_{i=0}^t)$),其中 P_t^σ 是时间 τ 状态 σ 下的路径。所以对于路径依赖工具,需要列举出到特定状态的路径,对于每一个路径的计算可用

Monte Carlo 模拟。对于路径依赖工具网阵中 T 时刻的价格估算的计算量要用为 $O(T^2/2)$, 而路径独立为 $O(2^T)$ 。在 Wharton 学校的金融建模和模拟 HERMES 实验室里, 实现了高性能计算在复杂金融工具的定价中的第一次应用, 它是给抵押支持证券定价。实验的结果表明在工作站上要花几个小时进行模拟的问题, 在 CRAY X-MP 巨型机上只需要用几分钟 (15 左右), 在大规模并行系统中则少于一分钟。

4.2 综合金融产品管理

由于金融工具具有多方面风险以及金融市场的综合性, 这要求对金融管理有深刻的了解。综合方法要包括金融产品的设计、定价和投资以及公司证券的资本化等多个方面。Holmer 和 Zenios 提出了综合金融产品管理 (IPM) 框架, 它伴随着金融规划的全过程。在实际环境中它以企业广泛风险管理或总的综合风险管理出现。IPM 模型集成了证券定价的 Monte Carlo 模拟和大量随机规划优化模型。

实现 IPM 框架可利用可追索随机规划 (stochastic programming with recourse) 的数学模型, 它采用了可追索决策, 例如, 投资经理要选定的投资组合, 既要考虑未来股票价格的波动, 也要考虑重新平衡投资组合价格的变化。这个模型的两阶段形式被规范化为一个具有限制矩阵条件的特殊结构的大规模确定性非线性过程。

$$\text{Min } (f(x) + E[\text{Min}_{y \in R^p} \{q(y, \omega) | T(\omega) + W(\omega)y = h(\omega)\}]) \quad (3)$$

$$\text{s. t. } Ax = b \\ x \in R^n$$

$E(\cdot)$ 表示预期值, Min 表示最小函数值, $x \in R^n$ 表示第一阶段的决策矢量, 它是在随机变量观察和预期前做出的, $y \in R^p$ 表示第二阶段的决策矢量, 它是在随机变量被观察并在调整后做出的。他们受第一阶段决策的限制, 并且依赖随机矢量的实际值。自由矢量 w 是第一阶段的决策矢量 x 做出后观察到的值, $q(y, w)$ 为第二阶段的成本函数, $\{T(w), W(w), h(w) | w \in \Omega\}$ 表示模型的参数, 是随机矢量的函数, T 是 $m_1 \times n_0$ 的技术矩阵。它包含技术系数, 它能以第一阶段的决策 x 作为解决第二阶段问题的资源。 W 是 $m_1 \times n_1$ 的追索 (recourse) 矩阵, H 是第二阶段 m_1 维的资源矢量。第二阶段随机程序使第一阶段决策的成本与第二阶段的预期成本之和最小。具体模型请看参考文 [6]。

随机过程模型中最有名的例子是 Frank-Russel 以及 Yassuda-Kassai 和 Tower Perrins 的模型。一些早期研究成果包括 Kusy 和 Ziemba 的银行资产负债管理、Mulvey 和 Vladimirov 的资产分配, Zenios 的固定收入投资管理以及 Golub 等设计的在抵押市场上运用资产对一个三年保证性投资合同的资金决策模型。近期更多的工作是集成投资组合管理决策的汇率风险, 它是为了解决全球风险管理问题。在求解随机过程模型中, 大规模随机规划并行解决方案的算法集中于特殊结构问题的解决 (网络资源的特殊问题)。如在一个有 8K 处理元件的 Connection CM-2 机器上, 用一个特定目的的并行算法以及在一个 IRIS 4D/70 工作站上用一个一般内部代码来解决非线性随机网络问题时, 矩阵的大小从 1923 行 5468 列到 7647 行 21,777 列, 并且有 18 到 72 个方案。这种计算量在普通 PC 机或工作站中是难以实现的。

4.3 金融创新和金融产品的计算机辅助设计

金融创新被 Miller 定义为金融经济学中的“革命”。Ross (1989) 写到: “在他对总统在美国金融委员会上的演讲所著评论发表 10 年后, 金融产品的设计仍然停留在艺术而非科学上。计算金融正在为这一发展扮演重要角色。” [6]

Consiglio 和 Zenios 设计的可赎回债券收益模型就是这一应用的实例 [7]。它是用可选方案离散集合的形式表示不确定性, 集合表示为 $\Omega = \{1, 2, \dots, S\}$ 。假设机构由负债和股东出资为这些资产提供资金, 证券资产已经存在, 资产收益 (ROE) 可表示为:

$$ROE = \frac{(D+E)r_A^s - R_f^s}{E} \quad (4)$$

D 代表负债 (它是以金融产品的一种形式来发行债券), E 代表股权, r_A^s 表示 1 加上在股权持有期内方案 $s \in \Omega$ 的投资收益率, R_f^s 表示债券的收益。

在利用这个模型求解时, 为了决定最佳杠杆率, 需要决定各种不同方案 $s \in \Omega$ 的发行债券成本, 这需要决定债券的结构 (如每种产品发行的数量) 和最佳财务杠杆率。债券收益是一个产品的发行数量和各产品收益相关的函数。这就使问题变为: 从大量的债券产品中依据其相应的收益选定产品的种类和数量, 以及决定最佳产品组合和最佳杠杆率。这可模型化为一个非线性规划问题。这是一个动态模型, 通过重新定义和优化模型的输入, 可能会引入新金融产品。最优目标是找到产品设计和最佳产品组合, 最佳财务杠杆收益与 ROE 的最大化预期效用。这个模型的计算量是巨大的。如在用并行化的塔布搜索 (tabu search) 算法解决债券设计问题时, 在单处理器上总运行时间 7.5 小时, 用并行方法将减少到低于半个小时。

结束语 随着金融市场的全球化, 推动了金融领域, 如风险定价、综合金融产品管理和金融创新数学模型的发展, 计算技术在金融中的应用深度和广度不断加强。在高性能计算的年代, 依据其高速数据处理和海量信息存储功能, 可以对金融市场、金融机构、金融过程进行仿真和基于此的深度金融数据挖掘, 从而对金融系统不确定性进行定性、定量研究。随着计算金融理论、方法、模型、算法的不断完善, 高性能计算技术和设备的发展、普及, 金融学家、数学家和物理学家等的广泛参与, 终将把计算金融推向一个全新的应用、发展水平。

参考文献

- 1 赵致琛. 关于计算机科学与技术认知问题的研究简报 [J]. 计算机研究与发展, 2001. 1
- 2 黄铠, 徐志伟. 可扩展的并行计算技术、结构与编程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 3 Los C A. Computational Finance: A Scientific Perspective [M]. World Scientific Publishing Ltd, Singapore, 2001
- 4 韩冀中, 韩承德. 高性能计算技术的发展现状及趋势 [J]. 中国工程科学, 2000. 1
- 5 陈国良编著. 并行计算——结构, 算法, 编程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 10
- 6 Maarten H, van der Vlerk. Stochastic Programming with Integer Recourse [M]. Netherlands, Labyrinth Publication, 1995
- 7 Consiglio A, Zenios S A. Designing portfolios of financial products via integrated simulation and optimization models [M]. Operations Research, March-April 1999
- 8 Zenios S A. High-performance computing in finance: The last 10 years and the next [J]. Parallel Computing, 1999, 25: 2149~2175
- 9 Northover K. Computational finance. IEEE Computing in Science & Engineering, Nov./Dec. 1999