

Issue XXXI: Abelian Categories

Namdak Tonpa

3 червня 2025 р.

Анотація

Ця стаття є оглядом абелевих категорій, введених Александром Гротендіком у 1957 році, як фундаментального інструменту гомологічної алгебри, алгебраїчної геометрії, теорії представлень, топологічної квантової теорії поля та теорії категорій. Ми розглядаємо формальне означення абелевих категорій, їхню роль у побудові похідних категорій і функторів, а також ключові застосування в різних галузях математики та фізики.

Зміст

1	Abelian Categories	1
1.1	Означення абелевих категорій	1
1.2	Деталізоване формальне означення	2
1.3	Мотивація та застосування	3
1.4	Похідні категорії та функтори	4
1.5	Висновки	4

1 Abelian Categories

Абелеві категорії, вперше введені Александром Гротендіком у його статті 1957 року «Sur quelques points d'algèbre homologique» [1], стали основою для уніфікації гомологічної алгебри в різних математичних дисциплінах, таких як алгебраїчна геометрія, алгебраїчна топологія та теорія представлень. Вони забезпечують природне середовище для вивчення гомологій, когомологій, похідних категорій і функторів, що мають широке застосування в математиці та математичній фізиці.

1.1 Означення абелевих категорій

Абелеві категорії — це збагачене поняття категорії Сандерса-Маклейна поняттями нульового об'єкту, що одночасно ініціальний та термінальний, властивостями існування всіх добутоків та кодобутоків, ядер та коядер, а

також, що всі мономорфізми і епіморфізми є ядрами і коядрами відповідно (тобто нормальними).

Формально, абелева категорія визначається наступним чином:

```
def isAbelian (C: precategory): U1
:=  $\Sigma$  (zero: hasZeroObject C)
    (prod: hasAllProducts C)
    (coprod: hasAllCoproducts C)
    (ker: hasAllKernels C zero)
    (coker: hasAllCokernels C zero)
    (monicsAreKernels:
       $\prod$  (A S: C.C.ob) (k: C.C.hom S A),
       $\Sigma$  (B: C.C.ob) (f: C.C.hom A B),
      isKernel C zero A B S f k)
    (epicsAreCoKernels:
       $\prod$  (B S: C.C.ob) (k: C.C.hom B S),
       $\Sigma$  (A: C.C.ob) (f: C.C.hom A B),
      isCokernel C zero A B S f k), U
```

Ця сигнатура включає: 1) існування нульового об'єкта; 2) існування всіх добутоків; 3) існування всіх кодобутоків; 4) існування всіх ядер; 5) існування всіх коядер; 6) властивість, що кожен мономорфізм є ядром; 7) властивість, що кожен епіморфізм є коядром.

1.2 Деталізоване формальне означення

Для чіткості наведемо ключові компоненти абелевої категорії в сучасному формалізмі, наприклад, у кубічній Агді, як описано в магістерській роботі Девіда Елндера 2021 року [2]:

```
module abelian where
import lib/mathematics/categories/category
import lib/mathematics/homotopy/truncation

def zeroObject(C: precategory) (X: C.C.ob): U1
:=  $\Sigma$  (bot: isInitial C X) (top: isTerminal C X), U

def hasZeroObject (C: precategory) : U1
:=  $\Sigma$  (ob: C.C.ob) (zero: zeroObject C ob), unit

def hasAllProducts (C: precategory) : U1
:=  $\Sigma$  (product: C.C.ob  $\rightarrow$  C.C.ob  $\rightarrow$  C.C.ob)
    ( $\pi_1$ :  $\prod$  (A B : C.C.ob), C.C.hom (product A B) A)
    ( $\pi_2$ :  $\prod$  (A B : C.C.ob), C.C.hom (product A B) B), U

def hasAllCoproducts (C: precategory) : U1
:=  $\Sigma$  (coproduct: C.C.ob  $\rightarrow$  C.C.ob  $\rightarrow$  C.C.ob)
    ( $\sigma_1$ :  $\prod$  (A B : C.C.ob), C.C.hom A (coproduct A B))
    ( $\sigma_2$ :  $\prod$  (A B : C.C.ob), C.C.hom B (coproduct A B)), U

def isMonic (P: precategory) (Y Z : P.C.ob) (f : P.C.hom Y Z) : U
:=  $\prod$  (X : P.C.ob) (g1 g2 : P.C.hom X Y),
    Path (P.C.hom X Z) (P.P. $\circ$  X Y Z g1 f) (P.P. $\circ$  X Y Z g2 f)
 $\rightarrow$  Path (P.C.hom X Y) g1 g2

def isEpic (P : precategory) (X Y : P.C.ob) (f : P.C.hom X Y) : U
```

```

:=  $\Pi$  (Z : P.C.ob) (g1 g2 : P.C.hom Y Z),
   Path (P.C.hom X Z) (P.P. $\circ$  X Y Z f g1) (P.P. $\circ$  X Y Z f g2)
→ Path (P.C.hom Y Z) g1 g2

def kernel (C: precategory) (zero: hasZeroObject C)
  (A B S: C.C.ob) (f: C.C.hom A B) : U1
:=  $\Sigma$  (k: C.C.hom S A) (monic: isMonic C S A k), unit

def cokernel (C: precategory) (zero: hasZeroObject C)
  (A B S: C.C.ob) (f: C.C.hom A B) : U1
:=  $\Sigma$  (k: C.C.hom B S) (epic: isEpic C B S k), unit

def isKernel (C: precategory) (zero: hasZeroObject C)
  (A B S: C.C.ob) (f: C.C.hom A B) (k: C.C.hom S A) : U1
:=  $\Sigma$  (ker: kernel C zero A B S f), Path (C.C.hom S A) ker.k k

def isCokernel (C: precategory) (zero: hasZeroObject C)
  (A B S: C.C.ob) (f: C.C.hom A B) (k: C.C.hom B S) : U1
:=  $\Sigma$ 
  (coker: cokernel C zero A B S f), Path (C.C.hom B S) coker.k k

def hasKernel (C: precategory) (zero: hasZeroObject C)
  (A B: C.C.ob) (f: C.C.hom A B) : U1
:=  $\|_{-1}$  ( $\Sigma$  (monic: isMonic C A B f), unit)

def hasCokernel (C: precategory) (zero: hasZeroObject C)
  (A B: C.C.ob) (f: C.C.hom A B) : U1
:=  $\|_{-1}$  ( $\Sigma$  (epic: isEpic C A B f), unit)

def hasAllKernels (C : precategory) (zero: hasZeroObject C) : U1
:=  $\Sigma$  (A B : C.C.ob) (f : C.C.hom A B), hasKernel C zero A B f

def hasAllCokernels (C : precategory) (zero: hasZeroObject C) : U1
:=  $\Sigma$  (A B : C.C.ob) (f : C.C.hom A B), hasCokernel C zero A B f

```

Ці означення уточнюють поняття нульового об'єкта, добутків, кодобутків, мономорфізмів, епіморфізмів, ядер і коядер, необхідних для абелевих категорій.

1.3 Мотивація та застосування

Абелеві категорії мають численні застосування в різних галузях математики та фізики. Ось п'ять ключових напрямів:

1) Гомологічна алгебра: абелеві категорії забезпечують основу для гомологічної алгебри, яка вивчає властивості груп гомології та когомології. Теорія похідних функторів, фундаментальний інструмент гомологічної алгебри, базується на понятті абелевої категорії.

2) Алгебраїчна геометрія: абелеві категорії використовуються для вивчення когомологій пучка, що є потужним інструментом для розуміння геометричних властивостей алгебраїчних многовидів. Зокрема, категорія пучків абелевих груп на топологічному просторі є абелевою категорією.

3) Теорія представлень: абелеві категорії виникають у теорії представлень, яка досліджує алгебраїчні структури, пов'язані з симетріями.

Наприклад, категорія модулів над кільцем є абелевою категорією.

4) Топологічна квантова теорія поля: абелеві категорії відіграють центральну роль у топологічній квантовій теорії поля, де вони виникають як категорії граничних умов для певних типів теорій топологічного поля.

5) Теорія категорій: абелеві категорії є важливим об'єктом дослідження в теорії категорій, зокрема для вивчення адитивних функторів. Рекомендується робота Бакура і Деляну «Вступ в теорію категорій та функторів» [3] для поглибленого ознайомлення.

1.4 Похідні категорії та функтори

Абелеві категорії забезпечують природну основу для гомологічної алгебри, яка є розділом алгебри, що має справу з алгебраїчними властивостями груп гомологій та когомологій. Зокрема, абелеві категорії створюють сеттінг, де можна визначити поняття похідних категорій і похідних функторів.

Основна ідея похідних категорій полягає в тому, щоб ввести нову категорію, яка побудована з абелевої категорії шляхом «інвертування» певних морфізмів, майже так само, як будується поле часток на області цілісності. Похідна категорія абелевої категорії фіксує «правильне» поняття гомологічних і когомологічних груп і забезпечує потужний інструмент для вивчення алгебраїчних властивостей цих груп.

Похідні функтори є фундаментальним інструментом гомологічної алгебри, і їх можна визначити за допомогою концепції похідної категорії. Основна ідея похідних функторів полягає в тому, щоб взяти функтор, який визначено в абелевій категорії, і «підняти» його до функтора, який визначений у похідній категорії. Похідний функтор потім використовується для обчислення вищих груп гомології та когомології об'єктів в абелевій категорії.

Використання похідних категорій і функторів зробило революцію у вивченні гомологічної алгебри, і це призвело до багатьох важливих застосувань в алгебраїчній геометрії, топології та математичній фізиці. Наприклад, похідні категорії використовувалися для доведення фундаментальних результатів алгебраїчної геометрії, таких як знаменита теорема Гротендіка-Рімана-Роха. Вони також використовувалися для вивчення дзеркальної симетрії в теорії суперструн.

1.5 Висновки

Абелеві категорії, введені Гротендіком, є фундаментальним інструментом сучасної математики, що забезпечує уніфікований підхід до гомологічної алгебри, алгебраїчної геометрії, теорії представлень, топологічної квантової теорії поля та теорії категорій. Їхня роль у побудові похідних категорій і функторів відкрила нові можливості для вивчення гомологій і когомологій, а також їхніх застосувань у математиці та фізиці. Подальший розвиток теорії абелевих категорій, зокрема в контексті унівалентної теорії типів, як

показано в роботі Еліндера [2], обіцяє нові перспективи для формальної математики та комп'ютерних наук.

Література

- [1] А. Гротендік, *Sur quelques points d'algèbre homologique*, 1957.
- [2] Д. Еліндер, *Дослідження абелевих категорій і унівалантної теорії типів*, магістерська робота, 2021.
- [3] І. Бакур, А. Деляну, *Вступ в теорію категорій та функторів*.