UNIVERSITÀ DI TRENTO

Greither unit undex

Giacomo Borin

Dipartimento di Matematica

27 maggio 2021

In questo lavoro ho rielaborato l'articolo:

Cornelius Greither. "Improving Ramachandra's and Levesque's unit index". English. In: *Number theory. Fifth conference of the Canadian Number Theory Association, Ottawa, Ontario, Canada, August 17–22, 1996*. Providence, RI: American Mathematical Society, 1999, pp. 111–120. ISBN: 0-8218-0964-4/pbk

Completando i prerequisiti richiesti per la comprensione e implementando alcuni calcoli in sage

In questo lavoro ho rielaborato l'articolo:

Cornelius Greither. "Improving Ramachandra's and Levesque's unit index". English. In: *Number theory. Fifth conference of the Canadian Number Theory Association, Ottawa, Ontario, Canada, August 17–22, 1996*. Providence, RI: American Mathematical Society, 1999, pp. 111–120. ISBN: 0-8218-0964-4/pbk

Completando i prerequisiti richiesti per la comprensione e implementando alcuni calcoli in sage

Bibliografia I

- K. Ramachandra. "On the units of cyclotomic fields". English. In: *Acta Arith.* 12 (1966), pp. 165–173. ISSN: 0065-1036; 1730-6264/e.
- W. Sinnott. *On the Stickelberger ideal and the circular units of an abelian field*. English. Theorie des nombres, Semin. Delange-Pisot-Poitou, Paris 1979-80, Prog. Math. 12, 277-286 (1981). 1981.
- Lawrence C. Washington. *Introduction to cyclotomic fields*. English. Vol. 83. Springer, New York, NY, 1982.

Prereqisiti

Primo oggetto di interesse: E_K

Il gruppo delle unità di K, il sottocampo reale massimo di $\mathbb{Q}(\zeta_n)$

- ζ_n l'n-esima radice ciclotomica (con $n \not\equiv 2 \mod 4$)
- $K = \mathbb{Q}(\zeta_n + \zeta_n^{-1})$
- $O_K = \mathbb{Z}[\zeta_n + \zeta_n^{-1}]$
- $E_K = O_K^*$, cioè l'insieme degli elementi invertibili

Salta dimostrazione

Il gruppo delle unità

Primo oggetto di interesse: E_K

Il gruppo delle unità di K, il sottocampo reale massimo di $\mathbb{Q}(\zeta_n)$

- ζ_n l'n-esima radice ciclotomica (con $n \not\equiv 2 \mod 4$)
- $K = \mathbb{Q}(\zeta_n + \zeta_n^{-1})$
- $O_K = \mathbb{Z}[\zeta_n + \zeta_n^{-1}]$
- $E_K = O_K^*$, cioè l'insieme degli elementi invertibili

Salta dimostrazione

Primo oggetto di interesse: E_K

Il gruppo delle unità di K, il sottocampo reale massimo di $\mathbb{Q}(\zeta_n)$

- ζ_n l'n-esima radice ciclotomica (con $n \not\equiv 2 \mod 4$)
- $K = \mathbb{Q}(\zeta_n + \zeta_n^{-1})$
- $O_K = \mathbb{Z}[\zeta_n + \zeta_n^{-1}]$
- $E_K = O_K^*$, cioè l'insieme degli elementi invertibili

Salta dimostrazione

Primo oggetto di interesse: E_K

Il gruppo delle unità di K, il sottocampo reale massimo di $\mathbb{Q}(\zeta_n)$

- ζ_n l'n-esima radice ciclotomica (con $n \not\equiv 2 \mod 4$)
- $K = \mathbb{Q}(\zeta_n + \zeta_n^{-1})$
- $O_K = \mathbb{Z}[\zeta_n + \zeta_n^{-1}]$
- $E_K = O_K^*$, cioè l'insieme degli elementi invertibili

Salta dimostrazione

Primo oggetto di interesse: E_K

Il gruppo delle unità di K, il sottocampo reale massimo di $\mathbb{Q}(\zeta_n)$

- ζ_n l'n-esima radice ciclotomica (con $n \not\equiv 2 \mod 4$)
- $K = \mathbb{Q}(\zeta_n + \zeta_n^{-1})$
- $O_K = \mathbb{Z}[\zeta_n + \zeta_n^{-1}]$
- $E_K = O_K^*$, cioè l'insieme degli elementi invertibili

Salta dimostrazione

Dimostrazione.

- $\zeta_n + \zeta_n^{-1}$ è **reale**:

$$\overline{\zeta_n + \zeta_n^{-1}} = \overline{\zeta_n} + \overline{\zeta_n}^{-1} = \zeta_n^{-1} + \zeta_n$$

- L'indice $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : K]$ vale $\mathbf{2}$, ed è quindi minimale. Il suo polinomio minimo è:

$$f(x) = (x - \zeta)(x - \zeta^{-1}) = x^2 - (\zeta + \zeta^{-1})x + 1$$

Dimostrazione.

- $\zeta_n + \zeta_n^{-1}$ è **reale**:

$$\overline{\zeta_n + \zeta_n^{-1}} = \overline{\zeta_n} + \overline{\zeta_n}^{-1} = \zeta_n^{-1} + \zeta_n$$

- L'indice $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : K]$ vale **2**, ed è quindi minimale. Il suo polinomio minimo è:

$$f(x) = (x - \zeta)(x - \zeta^{-1}) = x^2 - (\zeta + \zeta^{-1})x + 1$$

Dimostrazione.

- $\zeta_n + \zeta_n^{-1}$ è **reale**:

$$\overline{\zeta_n + \zeta_n^{-1}} = \overline{\zeta_n} + \overline{\zeta_n}^{-1} = \zeta_n^{-1} + \zeta_n$$

- L'indice $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : K]$ vale **2**, ed è quindi minimale. Il suo polinomio minimo è:

$$f(x) = (x - \zeta)(x - \zeta^{-1}) = x^2 - (\zeta + \zeta^{-1})x + 1$$

Dimostrazione.

- Un sottocampo con queste caratteristiche è **unico**:

$$
\begin{tikzcd}
 & \mathbb{Q}(\zeta) & \\
K \arrow[ur, "2"] \arrow[r] & H \arrow[u, "2"] & K' \arrow[ul, "2"'] \arrow[l] \\
 & \mathbb{Q} \arrow[ul] \arrow[ur] &
\end{tikzcd}
$$

Dimostrazione.

- Un sottocampo con queste caratteristiche è **unico**:

$$
\begin{tikzcd}
 & \mathbb{Q}(\zeta) & \\
K \arrow[ur, "2"] \arrow[r] & H \arrow[u, "2"] & K' \arrow[ul, "2"'] \arrow[l] \\
 & \mathbb{Q} \arrow[ul] \arrow[ur] &
\end{tikzcd}
$$

$\square$

Gruppo di Galois di K

Proposizione

Il gruppo di Galois di $K/\mathbb{Q}$ è isomorfo a $\mathbb{Z}_n^*/\{\pm 1\}$

D'ora in poi indicheremo $G_0 := \mathrm{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$ e $G := \mathrm{Gal}(K/\mathbb{Q})$

Proposizione

Il gruppo di Galois di $K/\mathbb{Q}$ è isomorfo a $\mathbb{Z}_n^*/\{\pm 1\}$

D'ora in poi indicheremo $G_0 := \mathrm{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})$ e $G := \mathrm{Gal}(K/\mathbb{Q})$

Definizione

Se $\mathbb{K}$ è un campo numerico possiamo definire l'**ideal class group** come il quoziente $\mathcal{F}_{\mathbb{K}}/\mathcal{P}_{\mathbb{K}}$ dove:

$\mathcal{F}_{\mathbb{K}}$ è il gruppo degli ideali frazionari non nulli di $O_{\mathbb{K}}$,

$\mathcal{P}_{\mathbb{K}}$ è il gruppo degli ideali principali

Si può mostrare che questo gruppo è finito e definiamo il **numero delle classi** come:

$$h_K = |\mathcal{F}_{\mathbb{K}}/\mathcal{P}_{\mathbb{K}}|$$

Definizione

Se $\mathbb{K}$ è un campo numerico possiamo definire l'**ideal class group** come il quoziente $\mathcal{F}_{\mathbb{K}}/\mathcal{P}_{\mathbb{K}}$ dove:

$\mathcal{F}_{\mathbb{K}}$ è il gruppo degli ideali frazionari non nulli di $O_{\mathbb{K}}$,

$\mathcal{P}_{\mathbb{K}}$ è il gruppo degli ideali principali

Si può mostrare che questo gruppo è finito e definiamo il **numero delle classi** come:

$$h_K = |\mathcal{F}_{\mathbb{K}}/\mathcal{P}_{\mathbb{K}}|$$

Se considero il gruppo generato da $\{-1, \zeta, 1-\zeta^a \text{ for } a = 1, ..., n-1\}$ e lo interseco con E_K ottengo il gruppo delle **unità circolari**

Sinnot ha mostrato che esiste $a \in \mathbb{Z}$ tale che:

$$[E_K : C_K] = 2^a k_K$$

Se considero il gruppo generato da $\{-1, \zeta, 1 - \zeta^a \text{ for } a = 1, ..., n-1\}$ e lo interseco con E_K ottengo il gruppo delle **unità circolari**

Sinnot ha mostrato che esiste $a \in \mathbb{Z}$ tale che:

$$[E_K : C_K] = 2^a k_K$$

Costruire **esplicitamente** un gruppo C' con indice $[E_K : C']$ finito che sia **ottimale**

Definizione

Dato un gruppo X e un campo $\mathbb{F}$ un carattere di Dirchlet è un omomorfismo di gruppi $\chi : X \to \mathbb{F}^*$

Possiamo anche usare l'isomorfismo $G_0 \simeq \mathbb{Z}_n^*$ e definire χ come omomorfismo di anelli da $\mathbb{Z}_n$ in $\mathbb{C}$ (con χ nulla sugli elementi invertibili)

Il 'periodo' di un caratte è detto conduttore (in inglese **conductor**) e si indica con f_χ

Definizione

Dato un gruppo X e un campo $\mathbb{F}$ un carattere di Dirchlet è un omomorfismo di gruppi $\chi : X \to \mathbb{F}^*$

Possiamo anche usare l'isomorfismo $G_0 \simeq \mathbb{Z}_n^*$ e definire χ come omomorfismo di anelli da $\mathbb{Z}_n$ in $\mathbb{C}$ (con χ nulla sugli elementi invertibili)

Il 'periodo' di un caratte è detto conduttore (in inglese **conductor**) e si indica con f_χ

Definizione

Dato un gruppo X e un campo $\mathbb{F}$ un carattere di Dirchlet è un omomorfismo di gruppi $\chi : X \to \mathbb{F}^*$

Possiamo anche usare l'isomorfismo $G_0 \simeq \mathbb{Z}_n^*$ e definire χ come omomorfismo di anelli da $\mathbb{Z}_n$ in $\mathbb{C}$ (con χ nulla sugli elementi invertibili)

Il 'periodo' di un caratte è detto conduttore (in inglese **conductor**) e si indica con f_χ

Definizione

Dati un gruppo moltiplicativo X e un anello R possiamo definire l'**anello gruppale** $R[X]$ come l'R-modulo libero con base X, sul quale definiamo un operazione di moltiplicazione inducendola da quella di X

Nel nostro caso useremo $\mathbb{Z}[G_0]$ e $\mathbb{Z}[G]$, sui quali possiamo sempre esterndere il carattere χ (perchè definito sulla base)

Definizione

Dati un gruppo moltiplicativo X e un anello R possiamo definire l'**anello gruppale** $R[X]$ come l'R-modulo libero con base X, sul quale definiamo un operazione di moltiplicazione inducendola da quella di X

Nel nostro caso useremo $\mathbb{Z}[G_0]$ e $\mathbb{Z}[G]$, sui quali possiamo sempre esterndere il carattere χ (perchè definito sulla base)

Notazione

Dati $z \in \mathbb{Q}(\zeta)$ e $f \in \mathbb{Z}[G_0]$ è ben definita la nutazione esponenziale x^f, infatti dati $g \in G_0$ abbiamo una buona definizione per $z^g = g(z)$ e $z^{g_1+g_2} = z^{g_1} z^{g_2}$

Notazione

Dati $z \in \mathbb{Q}(\zeta)$ e $f \in \mathbb{Z}[G_0]$ è ben definita la nutazione esponenziale x^f, infatti dati $g \in G_0$ abbiamo una buona definizione per $z^g = g(z)$ e $z^{g_1+g_2} = z^{g_1} z^{g_2}$

La costruzione di Greither

La funzione β

Dato $n = p_1^{e_1} \cdots p_s^{e_s}$ definiamo:

- $S = \{1, \ldots, n\}$
- $\mathcal{P}_S = \{I \mid I \subsetneq S\}$
- $n_I = \prod_{i \in I} p_i^{e_i}$

Consideriamo una funzione

$$\beta : \mathcal{P}_S \to \mathbb{Z}[G_0]$$

che utilizzeremo per costruire il sottogruppo cercato.

Definizione

β si dice moltiplicativa se $\beta(\emptyset) = 1$ e dati I, J con intersezione vuota abbiamo $\beta(I \cup J) = \beta(I)\beta(J)$.

Dato $n = p_1^{e_1} \cdots p_s^{e_s}$ definiamo:

- $S = \{1, ..., n\}$
- $\mathcal{P}_S = \{I \mid I \subsetneq S\}$
- $n_I = \prod_{i \in I} p_i^{e_i}$

Consideriamo una funzione

$$\beta : \mathcal{P}_S \to \mathbb{Z}[G_0]$$

che utilizzeremo per costruire il sottogruppo cercato.

Definizione

β si dice moltiplicativa se $\beta(\emptyset) = 1$ e dati I, J con intersezione vuota abbiamo $\beta(I \cup J) = \beta(I)\beta(J)$.

La funzione β

Dato $n = p_1^{e_1} \cdots p_s^{e_s}$ definiamo:

- $S = \{1, ..., n\}$
- $\mathcal{P}_S = \{I \mid I \subsetneq S\}$
- $n_I = \prod_{i \in I} p_i^{e_i}$

Consideriamo una funzione

$$\beta : \mathcal{P}_S \to \mathbb{Z}[G_0]$$

che utilizzeremo per costruire il sottogruppo cercato.

Definizione

β si dice moltiplicativa se $\beta(\emptyset) = 1$ e dati I, J con intersezione vuota abbiamo $\beta(I \cup J) = \beta(I)\beta(J)$.

Le unità di Greither

Definiamo ora, per ogni $a \in (1, n/2)$ coprimo con n l'unità reale:

$$\xi_a(\beta) := \zeta^{d_a(\beta)} \frac{\sigma_a(z(\beta))}{z(\beta)} \text{ con } d_a(\beta) = (1-a)\frac{t}{2}$$

dove abbiamo che

- $z_I := 1 - \zeta^{n_I}$
- $z(\beta) := \prod_{i \in I} z_I^{\beta(I)}$
- $\sigma_a(\zeta) = \zeta^a$

C_β è il gruppo generato da:

$$-1 \text{ e } \xi_a(\beta) \text{ per } 1 < a < n/2 \text{ e } (a, n) = 1$$

Per l'indice useremo la notazione

$$[E_K : C_\beta] = h_K i_\beta$$

C_β è il gruppo generato da:

$$-1 \text{ e } \xi_a(\beta) \text{ per } 1 < a < n/2 \text{ e } (a, n) = 1$$

Per l'indice useremo la notazione

$$[E_K : C_\beta] = h_K i_\beta$$

Buona definizione di C_β

Possiamo limitarci a definire β su $\mathbb{Z}[G]$ e poi considerare un sollevamento (in inglese lift)

Lemma

Se due funzioni β_1 e β_2 coincidono su $\mathbb{Q}(\zeta_{n/n_l})^a$ per ogni $l \in \mathcal{P}_S$ allora le unità $\xi_a(\beta)$ sono uniche a meno del segno

[a] $\zeta_{n/n_l} = \zeta_n^{n_l}$

Possiamo limitarci a definire β su $\mathbb{Z}[G]$ e poi considerare un sollevamento (in inglese lift)

Lemma

Se due funzioni β_1 e β_2 coincidono su $\mathbb{Q}(\zeta_{n/n_l})$[a] per ogni $l \in \mathcal{P}_S$ allora le unità $\xi_a(\beta)$ sono uniche a meno del segno

[a] $\zeta_{n/n_l} = \zeta_n^{n_l}$

Dati due insiemi Z, Y e una funzione $\phi : Y \to Z$ diciamo che $f' : X \to Y$ è un **sollevamento** di $f : X \to Z$ se commuta:

$$\begin{tikzcd} & Y \arrow[d, "\phi"] \\ X \arrow[ur, "f'"] \arrow[r, "f"'] & Z \end{tikzcd}$$

Nel nostro caso ϕ è il morfismo indotto dalla proiezione

$$G_0 \simeq \mathbb{Z}_n^* \to \mathbb{Z}_n^* / \pm 1 \simeq G$$

Precisazione sul sollevamento

Dati due insiemi Z, Y e una funzione $\phi : Y \to Z$ diciamo che $f' : X \to Y$ è un **sollevamento** di $f : X \to Z$ se commuta:

$$
\begin{tikzcd}
 & Y \arrow[d, "\phi"] \\
X \arrow[ur, "f'"] \arrow[r, "f"'] & Z
\end{tikzcd}
$$

Nel nostro caso ϕ è il morfismo indotto dalla proiezione

$$G_0 \simeq \mathbb{Z}_n^* \to \mathbb{Z}_n^* / \pm 1 \simeq G$$

Calcolo degli indici

Teorema

Data una funzione $\beta : \mathcal{P}_S \to \mathbb{Z}[G]$ *segue che*

$$i_\beta = \prod_{\substack{\chi \neq 1 \\ pari}} \left(\sum_{\substack{I \in \mathcal{P}_S \\ (f_\chi, n_I) = 1}} \phi(n_I) \cdot \chi(\beta(I)) \cdot \prod_{i \notin I} (1 - \chi^{-1}(p_i)) \right) \quad (1)$$

Dove abbiamo che:

- ϕ è la funzione di Eulero
- χ si dice *pari* se $\chi(-1) = 1$
- Con χ^{-1} si intende il carattere che vale $1/\chi$ sugli elementi invertibili

Teorema

Data una funzione $\beta : \mathcal{P}_S \to \mathbb{Z}[G]$ segue che

$$i_\beta = \prod_{\substack{\chi \neq 1 \\ pari}} \left(\sum_{\substack{I \in \mathcal{P}_S \\ (f_\chi, n_I) = 1}} \phi(n_I) \cdot \chi(\beta(I)) \cdot \prod_{i \notin I} (1 - \chi^{-1}(p_i)) \right) \tag{1}$$

Dove abbiamo che:

- ϕ è la funzione di Eulero
- χ si dice *pari* se $\chi(-1) = 1$
- Con χ^{-1} si intende il carattere che vale $1/\chi$ sugli elementi invertibili

Dato un campo numerico L consideriamo un insieme di unità indipendenti $\{\epsilon_1, \ldots, \epsilon_r\} \subset L$ e siano $\{\sigma_1, \ldots, \sigma_{r+1}\}$ le sue immersioni (embedding) in $\mathbb{R}$ o $\mathbb{C}$. Poniamo δ_j uguale a 1 se σ_j è reale e a 2 altrimenti. Allora il suo **regolatore** è definito come

$$R_L(\epsilon_1, \ldots, \epsilon_r) = |\det(\delta_i \log |\epsilon_j^{\sigma_i}|)_{1 \leq i,j \leq r}|$$

Lemma

Dati i gruppi $A \subset B$ di indice finito e generati da unità indipendenti di L vale che:

$$[B : A] = \frac{R_L(\epsilon_1, \ldots, \epsilon_r)}{R_L(\mu_1, \ldots, \mu_r)} \tag{2}$$

Dato un campo numerico L consideriamo un insieme di unità indipendenti $\{\epsilon_1, ..., \epsilon_r\} \subset L$ e siano $\{\sigma_1, ..., \sigma_{r+1}\}$ le sue immersioni (embedding) in $\mathbb{R}$ o $\mathbb{C}$. Poniamo δ_j uguale a 1 se σ_j è reale e a 2 altrimenti. Allora il suo **regolatore** è definito come

$$R_L(\epsilon_1, ..., \epsilon_r) = |\det(\delta_i \log|\epsilon_j^{\sigma_i}|)_{1 \leq i,j \leq r}|$$

Lemma

Dati i gruppi $A \subset B$ di indice finito e generati da unità indipendenti di L vale che:

$$[B : A] = \frac{R_L(\epsilon_1, ..., \epsilon_r)}{R_L(\mu_1, ..., \mu_r)} \tag{2}$$

Usando l'ultimo lemma possiamo vedere che per dimostrare il teorema basta mostrare che

$$R(\xi_a(\beta)) = \pm R_K h_K A$$

con $(a, n) = 1$, $1 < a < n/2$ e A è la parte destra dell'equazione 1.
Inoltre poi si procede (in modo molto tecnico) come nel capitolo 8 di [4] e usando:

Formula

$$\sum_{(a,n)=1} \chi^{-1}(a) \log |z^{\sigma_a \gamma}| = \chi(\gamma) \sum_{(a,n)=1} \chi^{-1}(a) \log |z^{\sigma_a}| \qquad (3)$$

Usando l'ultimo lemma possiamo vedere che per dimostrare il teorema basta mostrare che

$$R(\xi_a(\beta)) = \pm R_K h_K A$$

con $(a, n) = 1$, $1 < a < n/2$ e A è la parte destra dell'equazione 1. Inoltre poi si procede (in modo molto tecnico) come nel capitolo 8 di [4] e usando:

Formula

$$\sum_{(a,n)=1} \chi^{-1}(a) \log |z^{\sigma_a \gamma}| = \chi(\gamma) \sum_{(a,n)=1} \chi^{-1}(a) \log |z^{\sigma_a}| \qquad (3)$$

Indice per β moltiplicativa

Teorema

Se assumiamo che $\beta : \mathcal{P}_S \to \mathbb{Z}[G]$ sia moltiplicativa abbiamo che:

$$i_\beta = \prod_{\substack{\chi \neq 1 \\ pari}} \left(\prod_{p_i \nmid f_\chi} \left(\phi(p_i^{e_i}) \cdot \chi(\beta(i)) + 1 - \chi^{-1}(p_i) \right) \right) \qquad (4)$$

Dove $\beta(i)$ indica $\beta(\{i\})$

Se poniamo β costante ad 1 otteniamo l'indice delle unità per Ramachandra da [2]:

$$[E_K : C_R] = h_K \cdot \prod_{\substack{\chi \neq 1 \\ \text{even}}} \left(\prod_{p_i \nmid f_\chi} \left(\phi(p_i^{e_i}) + 1 - \chi(p_i) \right) \right) \tag{5}$$

Dove C_R è il gruppo generato da -1 e le unità della forma

$$\xi_a := \zeta^{d_a} \prod_{I \in \mathcal{P}_S} \frac{1 - \zeta^{a n_I}}{1 - \zeta^{n_I}} \text{ con } d_a = \frac{1}{2}(1-a) \sum_{I \in \mathcal{P}_S} n_I$$

Costruiamo β moltiplicativa, quindi definendo $\beta(i)$ per ogni $i \in \{1, ..., s\}$:

Definiamo G_i come il gruppo di Galois: $\mathrm{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_{n/p_i^{e_i}})^+/\mathbb{Q}))$ e consideriamo l'isomofismo di Frobenius:

$$F_i : G_i \to G_i \text{ con } \alpha \mapsto \alpha^{p_i}$$

Definiamo il suo elemento traccia N_{F_i} come:

$$N_{F_i} := 1 + F_i + ... + F_i^{\mathrm{ord}(F_i)-1} \in \mathbb{Z}[G_i]$$

Definizione di β

Costruiamo β moltiplicativa, quindi definendo $\beta(i)$ per ogni $i \in \{1, ..., s\}$:

Definiamo G_i come il gruppo di Galois: $\mathrm{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_{n/p_i^{e_i}})^+/\mathbb{Q}))$ e consideriamo l'isomofismo di Frobenius:

$$F_i : G_i \to G_i \text{ con } \alpha \mapsto \alpha^{p_i}$$

Definiamo il suo elemento traccia N_{F_i} come:

$$N_{F_i} := 1 + F_i + ... + F_i^{\mathrm{ord}(F_i)-1} \in \mathbb{Z}[G_i]$$

Definizione di β

Consideriamo ora un sollevamento (lift) $\overline{N_i}$ di N_{F_i} in $\mathbb{Z}[G_0]$ e definiamo

$$\beta(i) = \overline{N_i}$$

Ovviamente β non è unica, ma per il lemma visto prima lo sono le unità a meno di un segno, quindi lo è C_β

Consideriamo ora un sollevamento (lift) $\overline{N_i}$ di N_{F_i} in $\mathbb{Z}[G_0]$ e definiamo

$$\beta(i) = \overline{N_i}$$

Ovviamente β non è unica, ma per il lemma visto prima lo sono le unità a meno di un segno, quindi lo è C_β

Dato un primo p in $\mathbb{Z}$ e la sua estensione come ideale $pO_{\mathbb{K}}$ in O_K, dato che qeusto è un dominio di Dedekin possiamo fattorizzare:

$$pO_{\mathbb{K}} = \prod_{j=1}^{g} \mathfrak{p}_j^{\epsilon_j} \tag{6}$$

Definizione

Il numero g si dice essere **grado di decomposizione** di p nell'estensione $\mathbb{K}/\mathbb{Q}$.
Per ogni $j = 1, ..., g$, ϵ_j si dice essere **indice di ramificazione** di $\mathfrak{p}_j$ in $\mathbb{K}/\mathbb{Q}$.
Per ogni $j = 1, ..., g$, $f_j := [O_{\mathbb{K}}/\mathfrak{p}_j : \mathbb{Z}_p]$ si dice **grado di inerzia**.

Dato un primo p in $\mathbb{Z}$ e la sua estensione come ideale $pO_{\mathbb{K}}$ in O_K, dato che qeusto è un dominio di Dedekin possiamo fattorizzare:

$$pO_{\mathbb{K}} = \prod_{j=1}^{g} \mathfrak{p}_j^{\epsilon_j} \tag{6}$$

Definizione

Il numero g si dice essere **grado di decomposizione** di p nell'estensione $\mathbb{K}/\mathbb{Q}$.
Per ogni $j = 1, ..., g$, ϵ_j si dice essere **indice di ramificazione** di $\mathfrak{p}_j$ in $\mathbb{K}/\mathbb{Q}$.
Per ogni $j = 1, ..., g$, $f_j := [O_{\mathbb{K}}/\mathfrak{p}_j : \mathbb{Z}_p]$ si dice **grado di inerzia**.

Decomposizione in $\mathbb{Z}[\zeta_n + \zeta_n^{-1}]$

Si può provare che se $\mathbb{K}/\mathbb{Q}$ è un'estensione di Galois (come K/Q) ϵ_j, f_j non dipendono da j e quindi

$$n = \epsilon f g$$

Per $i \in 1, ..., s$ definiamo g_i, f_i, ϵ_i essere i gradi definiti prima per il primo p_i in $K/\mathbb{Q}$.
Queste costanti sono fortemente in relazione con altri oggetti visti finora, ad esempio si può provare:

- Se X è l'insieme dei carattari di $K/\mathbb{Q}$ vale $g_i = |\{\chi \in X \,|\, \chi(p_i) = 1\}$
- Il grado di inerzia f_i è uguale all'ordine del morphismo di Frobenius F_i

Si può provare che se $\mathbb{K}/\mathbb{Q}$ è un'estensione di Galois (come K/Q) ϵ_j, f_j non dipendono da j e quindi

$$n = \epsilon f g$$

Per $i \in 1, ..., s$ definiamo g_i, f_i, ϵ_i essere i gradi definiti prima per il primo p_i in $K/\mathbb{Q}$.

Queste costanti sono fortemente in relazione con altri oggetti visti finora, ad esempio si può provare:

- Se X è l'insieme dei carattari di $K/\mathbb{Q}$ vale $g_i = |\{\chi \in X \,|\, \chi(p_i) = 1\}$
- Il grado di inerzia f_i è uguale all'ordine del morphismo di Frobenius F_i

Decomposizione in $\mathbb{Z}[\zeta_n + \zeta_n^{-1}]$

Si può provare che se $\mathbb{K}/\mathbb{Q}$ è un'estensione di Galois (come K/Q) ϵ_j, f_j non dipendono da j e quindi

$$n = \epsilon f g$$

Per $i \in 1, ..., s$ definiamo g_i, f_i, ϵ_i essere i gradi definiti prima per il primo p_i in $K/\mathbb{Q}$.
Queste costanti sono fortemente in relazione con altri oggetti visti finora, ad esempio si può provare:

- Se X è l'insieme dei carattari di $K/\mathbb{Q}$ vale $g_i = |\{\chi \in X \,|\, \chi(p_i) = 1\}$
- Il grado di inerzia f_i è uguale all'ordine del morphismo di Frobenius F_i

Risultato finale

Teorema

Dato C_β definito come prima abbiamo che

$$i_\beta = \prod_{i=1}^{s} \epsilon_i^{g_i - 1} f_i^{2g_i - 1}$$

Questo indice si può dire ottimale perchè non solo rende più semplice la sua fattorizzazione (basta sapere quella di ϵ_i e f_i), ma inoltre sappiamo che questi dividono n, quindi i fattori di i_β sono solo i fattori di n.

Risultato finale

Teorema

Dato C_β definito come prima abbiamo che

$$i_\beta = \prod_{i=1}^{s} \epsilon_i^{g_i - 1} f_i^{2g_i - 1}$$

Questo indice si può dire ottimale perchè non solo rende più semplice la sua fattorizzazione (basta sapere quella di ϵ_i e f_i), ma inoltre sappiamo che questi dividono n, quindi i fattori di i_β sono solo i fattori di n.

Implementazione dei calcoli

Comandi usati I

Vediamo ora l'implementazione di alcuni calcoli in

I principali calcoli usati sono stati:

- Creazione del campo ciclotomico e della radice ζ

```
sage: Qn.<z> = CyclotomicField(n)
```

- Creazione del massimo sottocampo reale K:

```
sage: zz = z + z.conjugate()
sage: K = NumberField(zz.minpoly(),'a')
```

Comandi usati I

Vediamo ora l'implementazione di alcuni calcoli in

I principali calcoli usati sono stati:

- Creazione del campo ciclotomico e della radice ζ

```
sage: Qn.<z> = CyclotomicField(n)
```

- Creazione del massimo sottocampo reale K:

```
sage: zz = z + z.conjugate()
sage: K = NumberField(zz.minpoly(),'a')
```

Comandi usati II

- Creazione dell'ideale pO_K e sua fattorizzazione:

```
sage: I = K.ideal(p(i))
sage: I.factor()
```

- Creazione dell'omomorfismo $\zeta \mapsto \zeta^f$:

```
sage: Qn.hom([z**f])
```

Comunque ora vedremo direttamente l'implementazione in sage dei calcoli, presentata tramite jupyter

Comandi usati II

- Creazione dell'ideale pO_K e sua fattorizzazione:

```
sage: I = K.ideal(p(i))
sage: I.factor()
```

- Creazione dell'omomorfismo $\zeta \mapsto \zeta^f$:

```
sage: Qn.hom([z**f])
```

Comunque ora vedremo direttamente l'implementazione in sage dei calcoli, presentata tramite jupyter

Tabella dei contenuti II