

Programiranje 1

4. predavanje — 2. dodatak

Saša Singer

`singer@math.hr`

`web.math.pmf.unizg.hr/~singer`

PMF – Matematički odsjek, Zagreb

Sadržaj predavanja — dodatka

- Greške zaokruživanja u aritmetici realnih brojeva:
 - Greške zaokruživanja osnovnih aritmetičkih operacija.
 - Opasno ili “katastrofalno” kraćenje.
 - “Širenje” grešaka zaokruživanja.
 - Stabilni i nestabilni algoritmi.
- Primjeri širenja grešaka zaokruživanja i izbjegavanja nestabilnosti:
 - Parcijalne sume harmonijskog reda.
 - Korijeni kvadratne jednačbe.
 - Transformacije nestabilnih formula.

Realna aritmetika računala (IEEE standard)

Oznake

Oznaka. Neka je \mathcal{F} skup svih **realnih** brojeva koji se nalaze u **dozvoljenom rasponu** za **normalizirani** prikaz (u danom tipu).

Što to znači? Broj $x \in \mathcal{F}$ **ne mora** biti prikaziv, ali njegova

zaokružena aproksimacija $fl(x)$ **ima** **normalizirani** prikaz, pa onda i **malu** relativnu grešku.

Najmanji **normalizirani** prikazivi broj u danom tipu je

$$v_{\min} = [1.000 \dots 0] \cdot 2^{e_{\min}} = 2^{e_{\min}},$$

a **najveći** **normalizirani** prikazivi broj je

$$\begin{aligned} v_{\max} &= [1.111 \dots 1] \cdot 2^{e_{\max}} = (1 + (1 - 2^{-t})) \cdot 2^{e_{\max}} \\ &= 2(1 - 2^{-t-1}) \cdot 2^{e_{\max}} = (1 - 2^{-p}) \cdot 2^{e_{\max}+1}. \end{aligned}$$

Dakle, vrijedi $x \in \mathcal{F} \iff |fl(x)| \in [v_{\min}, v_{\max}]$.

Zaokruživanje u aritmetici

Osnovna pretpostavka za realnu aritmetiku u računalu:

- za sve četiri osnovne aritmetičke operacije vrijedi ista ocjena greške zaokruživanja kao i za prikaz brojeva.

Isto vrijedi i za neke matematičke funkcije, poput $\sqrt{\quad}$, ali ne vrijedi za sve funkcije (na pr. za \cos i \sin u okolini nule).

Preciznije: Neka \circ označava bilo koju operaciju $+$, $-$, $*$, $/$. Za prikazive brojeve u dozvoljenom rasponu $x, y \in \mathcal{F}$, takve da je i egzaktni rezultat $x \circ y$ u dozvoljenom rasponu (tj. u \mathcal{F}), vrijedi ocjena relativne greške

$$fl(x \circ y) = (1 + \varepsilon)(x \circ y), \quad |\varepsilon| \leq u.$$

Broj ε ovisi o x , y , operaciji \circ i aritmetici računala.

Zaokruživanje u aritmetici (nastavak)

Ova ocjena je **ekvivalentna** **idealnom** izvođenju aritmetičkih operacija:

- **egzaktno** izračunaj rezultat operacije $x \circ y$,
- **zaokruži** ga, pri spremanju rezultata u memoriju.

To **ne znači** da računalo **zaista** tako i računa. Naime,

- za $+$, $-$, $*$ to bi se još i moglo napraviti (egzaktne rezultati imaju konačan binarni prikaz),
- ali kod **dijeljenja** to sigurno **ne ide** (egzaktan kvocijent može imati beskonačan binarni prikaz).

Dakle, **važno** je samo da dobijemo istu **ocjenu greške** kao u “idealnom” računanju, a **nije važno** kako se stvarno računa!

Zaokruživanje u aritmetici (nastavak)

U principu, to **dozvoljava** da se rezultati **ponešto razlikuju** na raznim računalima (ovisno o stvarnoj realizaciji aritmetike), ali

- **ocjena relativne greške mora** biti ista.

Uočite da “mjesto za razlike” nema puno, tj. razlike su zaista **rijetke**.

Napomena. Oznaka $fl(\text{izraz})$, općenito, označava **izračunatu** vrijednost izraza, tj. ona mora biti **prikaziva**.

- Ali, to **ne znači**: “izračunaj egzaktno”, pa “zaokruži”,
- nego: **izračunaj sve** operacije i funkcije **u aritmetici računala** (tj. i svaki **međurezultat** mora biti **prikaziv**).

Zaokruživanje u aritmetici (nastavak)

Još nekoliko napomena o točnosti aritmetike. Relacija

$$fl(x \circ y) = (1 + \varepsilon)(x \circ y), \quad |\varepsilon| \leq u,$$

kaže da **izračunati rezultat** $fl(x \circ y)$ ima **malu relativnu grešku** obzirom na egzakti rezultat $x \circ y$.

Obratite pažnju na **uvjete** uz koje vrijedi taj zaključak:

- **ulazne vrijednosti** moraju biti **prikazive** (što je jasno), ali i **u dozvoljenom rasponu**, tj. **normalizirane**,
- **egzakti rezultat** mora, također, biti **u dozvoljenom rasponu**.

Bez **oba** uvjeta, zaključak **ne vrijedi**.

Zaokruživanje u aritmetici (nastavak)

Prvi uvjet — na ulaz, “zvuči razumno” i s njim nije teško izaći na kraj.

Ako je (barem jedna) ulazna vrijednost nula, onda su operacije

- ili egzaktne, tj. nema greške

(operacije $+$, $-$, $*$, $0/y$, uz $y \neq 0$, i funkcija $\sqrt{\quad}$),

- ili dijelimo s nulom, pa dobivamo Inf ili NaN ili grešku.

Za sve ostale moguće nenormalizirane operande i ne očekujemo neki “točan” rezultat.

U svakom slučaju, ulazne vrijednosti uvijek možemo testirati (tj. provjeriti) u programu i tako kontrolirati što se događa.

Zaokruživanje u aritmetici (nastavak)

Drugi uvjet — na rezultat, je mnogo teže kontrolirati:

- izračunati rezultat “vidimo” tek kad ga izračunamo, i tad je sve gotovo, a egzakti rezultat ionako ne znamo.

Općenito, može nam se dogoditi da je egzakti rezultat izvan prikazivog raspona (kao i kod prikaza brojeva):

- “blizu nula” po apsolutnoj vrijednosti — tzv. **underflow**, i
 - računalo tada “šutke” vraća nulu ili nenormalizirani broj “blizu” nule (bez poruke o grešci),
- “prevelik” po apsolutnoj vrijednosti — tzv. **overflow**, i
 - računalo tada vraća **Inf** ili javlja grešku (i prekida izvršavanje programa).

Zaokruživanje u aritmetici (nastavak)

Naravno, **treća** mogućnost je da radimo **nedozvoljenu** operaciju, pa je rezultat **NaN** ili **greška**, ali to se može spriječiti kontrolom unaprijed.

Ni u jednom od ova **tri** slučaja **ne dobivamo malu relativnu grešku** — dakle, ranija ocjena **ne vrijedi**.

Oprez: čisto statistički gledano, po svim dozvoljenim operandima, **množenje** i **dijeljenje** relativno **često** daju (**egzaktne**) rezultat **izvan prikazivog raspona** (na pr. x^2).

Iako **egzaktne** rezultat operacije **ne znamo** unaprijed, to **ne znači** da

- nema mogućnosti kontrole pojave rezultata **izvan prikazivog raspona** (i pripadnog **gubitka točnosti**).

Zaokruživanje u aritmetici (nastavak)

Naprotiv, gomila nepotrebnih pojava **underflowa** i, posebno, **overflowa**

- može se izbjeći pažljivim projektiranjem algoritama.

Overflow je, općenito, **opasniji**, jer

- nema “gradiranog” prijelaza (kao kod **underflowa**),
- najčešće (još uvijek) završava greškom, tj. prekidom izvršavanja programa.

Zato se računanje obično “**skalira**” tako da se izbjegne **overflow**. U većini slučajeva, to se postiže

- jednostavnim transformacijama standardnih formula.**

Primjeri malo kasnije.

Širenje grešaka zaokruživanja

Širenje grešaka zaokruživanja

Vidimo da gotovo **svaki** izračunati rezultat ima neku **grešku**.
Osim toga,

- zaokruživanje se vrši nakon **svake pojedine operacije**.

Najlakše je stvar zamišljati kao da zaokruživanje ide “na kraju” operacije, iako je ono “dio operacije”.

Kad imamo **puno** aritmetičkih operacija (inače nam računalo ne treba), dolazi do tzv.

- akumulacije** ili **širenja** grešaka zaokruživanja.

Malo pogrešni rezultati (možda već od čitanja), ulaze u operacije, koje opet malo griješe, i tako redom ...

- greške** se “**šire**” kroz **sve što računamo!**

Širenje grešaka zaokruživanja (nastavak)

Očekujemo da greške “rastu”, ali koliko?

☛ “Pomalo”, ili “brzo”?

Ključno pitanje: Možemo li nešto reći o tom “rasprostiranju” grešaka zaokruživanja?

Možemo!

Ali, (uvijek ima neki “ali”),

☛ put do odgovora nije nimalo jednostavan,

☛ i treba ga provesti za svaki pojedini proračun posebno.

Gdje je problem?

Širenje grešaka zaokruživanja (nastavak)

Nažalost,

- aritmetika računala nije egzaktna
- i u njoj ne vrijede uobičajeni zakoni za operacije na \mathbb{R} .

Na primjer, za aritmetičke operacije u računalu

- nema asocijativnosti zbrajanja i množenja,
- nema distributivnosti množenja prema zbrajanju.

Dakle, poredak izvršavanja operacija je bitan!

Zapravo, jedino standardno pravilo koje vrijedi je

- komutativnost za zbrajanje i za množenje.

(Relativno nedavno je postojalo računalo na kojem ni to nije vrijedilo — prva Cray računala).

Primjer: Neasocijativnost zbrajanja

Primjer neasocijativnosti zbrajanja

Primjer. **Asocijativnost** zbrajanja u računalu **ne vrijedi**.

Znamo (odn. uskoro ćete znati) da je tzv. **harmonijski** red

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{i} + \dots$$

divergentan, tj. suma mu je “**beskonačna**”.

No, nitko nas ne spriječava da računamo **konačne** početne komade ovog reda, tj. **njegove parcijalne sume**

$$S_n := 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n}.$$

A kojim **redom** zbrajamo? (Zbrajanje je **binarna** operacija!)

Primjer neasocijativnosti zbrajanja (nastavak)

U **realnim** brojevima je **potpuno svejedno** kojim poretkom zbrajanja računamo ovu sumu, jer vrijedi **asocijativnost**.

$$a + (b + c) = (a + b) + c = a + b + c.$$

Uostalom, sam zapis izraza **bez zagrada**

$$S_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n}$$

već “podrazumijeva” **asocijativnost**. U suprotnom, morali bismo **zagradama** naglasiti **poredak** operacija.

Ovdje imamo točno $n - 1$ **binarnih operacija zbrajanja**, i možemo ih napraviti **kojim redom hoćemo**.

Primjer neasocijativnosti zbrajanja (nastavak)

Drugim riječima, u prethodni izraz za S_n

- možemo rasporediti zagrade na **bilo koji način**, samo da svi plusevi budu “**binarni**”, tj. zbrajaju **dva** objekta, a objekt je **broj** ili (podizraz u zagradama).

Na pr., zbrajanju “**unaprijed**” odgovara raspored zagrada

$$S_{n,1} := \left(\dots \left(\left(1 + \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{3} \right) + \dots + \frac{1}{n-1} \right) + \frac{1}{n},$$

a zbrajanju “**unatrag**” odgovara raspored zagrada

$$S_{n,2} := 1 + \left(\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{3} + \dots + \left(\frac{1}{n-1} + \frac{1}{n} \right) \dots \right) \right).$$

Primjer neasocijativnosti zbrajanja (nastavak)

Koliko takvih rasporeda zagrada ima — bit će napravljeno u **Diskretnoj matematici** (tzv. **Catalanovi brojevi**). Bitno nam je samo da svi ti rasporedi, matematički, daju **isti rezultat**.

Komutativnost nam uopće **ne treba**. Ako i nju iskoristimo, dobivamo još puno **više** načina za računanje ove sume, i svi, naravno, opet daju **isti rezultat**.

Izračunajmo **aritmetikom računala** navedene **dvije** sume

• $S_{n,1}$ — unaprijed, i

• $S_{n,2}$ — unatrag,

za $n = 1\,000\,000$, u **tri** standardne **IEEE** točnosti: **single**, **double** i **extended**. Preciznije, koristimo ova tri tipa za prikaz brojeva, uz pripadne aritmetike za računanje.

Primjer neasocijativnosti zbrajanja (nastavak)

Uz skraćene oznake S_1 i S_2 za **varijable** u kojima zbrajamo pripadne sume, odgovarajući **algoritmi** za zbrajanje su

● **unaprijed:**

$$S_1 := 1,$$

$$S_1 := S_1 + \frac{1}{i}, \quad i = 2, \dots, n,$$

● **unatrag:**

$$S_2 := \frac{1}{n},$$

$$S_2 := \frac{1}{i} + S_2, \quad i = n - 1, \dots, 1.$$

Dakle, zaista **ne koristimo** komutativnost zbrajanja.

Primjer neasocijativnosti zbrajanja (nastavak)

Dobiveni rezultati za sume S_1 , S_2 i pripadne relativne greške su:

tip i suma	vrijednost	rel. greška
single S_1	14.3573579788208008	2.45740E-0003
single S_2	14.3926515579223633	5.22243E-0006
double S_1	14.3927267228647810	6.54899E-0014
double S_2	14.3927267228657545	-2.14449E-0015
extended S_1	14.3927267228657234	1.91639E-0017
extended S_2	14.3927267228657236	-1.08475E-0018

Slovo E u brojevima zadnjeg stupca znači “puta 10 na”, pa je, na primjer, $-1.08475E-0018 = -1.08475 \times 10^{-18}$.

Primjer neasocijativnosti zbrajanja (nastavak)

Izračunate vrijednosti S_1 i S_2 su različite (u sve tri točnosti). Dakle, zbrajanje brojeva u aritmetici računala, očito, nije asocijativno.

Primijetite da, u sve tri točnosti, zbrajanje unatrag S_2 daje nešto točniji rezultat. To nije slučajno.

Svi brojevi koje zbrajamo su istog predznaka pa zbroj stalno raste, bez obzira na poredak zbrajanja.

- Kad zbrajamo unatrag — od manjih brojeva prema većim, zbroj se pomalo “nakuplja”.
- Obratno, kad zbrajamo unaprijed — od velikih brojeva prema manjim, zbroj puno brže naraste. Pred kraj, mali dodani član jedva utječe na rezultat (tj. dobar dio znamenki pribrojnika nema utjecaj na sumu).

Primjer neasocijativnosti zbrajanja (nastavak)

Drugim riječima, uz isti broj pribrojnika, kod zbrajanja unaprijed

- dodajemo manji broj, ali na veću (dotadašnju) sumu, pa je utjecaj tog pribrojnika bitno manji, a greška veća.

Ovo se izrazito vidi u single S_1 . U usporedbi sa single S_2

- pripadna relativna greška je preko 400 puta veća i dobivamo samo 3 točne znamenke u rezultatu.

Cijeli ovaj eksperiment je napravljen u “prastarom” Turbo Pascalu 7.0 (za DOS) — jer jednostavno podržava sva tri standardna IEEE tipa. Probajte to napraviti u C-u, FORTRAN-u ili nekom drugom programskom jeziku.

Primjer neasocijativnosti zbrajanja (zadatak)

Zadatak. U aritmetici računala, za dovoljno velike n , parcijalne sume $S_{n,1}$ i $S_{n,2}$ postaju **konstantne**, tj. više **ne ovise** o n .

- Zašto? Precizno objasnite!
- Za koji n se to prvi puta događa, ovisno o **točnosti** i **smjeru** zbrajanja?
 - Probajte u **single**, pa zaključite što će se dogoditi u **double** i **extended** (bez eksperimentiranja).
- Koji smjer zbrajanja je **bolji**?

Na kraju ovog primjera, možda je zgodno reći odakle mi “**točan**” rezultat — tj. onaj koji služi za računanje relativnih grešaka u prethodnoj tablici.

Primjer neasocijativnosti zbrajanja (kraj)

Postoji algoritam zbrajanja, tzv. dvostruko kompenzirano zbrajanje (engl. doubly compensated summation), koji uvijek daje zbroj s vrlo malom relativnom greškom (oko $2u$, ako broj pribrojnika nije prevelik). Taj algoritam daje

$$\text{extended } S_{DC} = 14.3927267228657236.$$

Na 18 dekadskih znamenki, rezultat je isti kao i S_2 .

Koga zanima taj i slični algoritmi, može pogledati knjigu:

- Nicholas J. Higham, Accuracy and Stability of Numerical Algorithms (2. ed.), SIAM, Philadelphia, 2002.

Naravno, može se javiti i meni! ■

Širenje grešaka u aritmetici

Širenje grešaka zaokruživanja (nastavak)

Za analizu grešaka zaokruživanja ne možemo koristiti nikakva “normalna” pravila za aritmetičke operacije u računalu, jer ti zakoni naprosto ne vrijede.

Stvarna algebarska struktura je izrazito komplicirana i postoje debele knjige na tu temu.

- Vrijede neka “zamjenska” pravila, ali su neupotrebljiva za analizu iole većih proračuna.

Međutim, analiza pojedinih operacija postaje bitno lakša, ako uočimo da:

- greške zaokruživanja u aritmetici računala možemo interpretirati i kao egzaktne operacije, ali na “malo” pogrešnim podacima!

Širenje grešaka zaokruživanja (nastavak)

Kako? Dovoljno je faktor $(1 + \varepsilon)$ u ocjeni greške

$$fl(x \circ y) = (1 + \varepsilon)(x \circ y), \quad |\varepsilon| \leq u,$$

“zalijepiti” na x i/ili y . To je isto kao da operand(i) ima(ju) neku relativnu grešku na ulazu u operaciju, a operacija \circ je egzaktna. Dakle,

- izračunati (ili “zaokruženi”) rezultat jednak je egzaktnom rezultatu, ali za malo promijenjene (tj. perturbirane) podatke (u relativnom smislu).

Što dobivamo ovom interpretacijom?

- Onda možemo koristiti “normalna” pravila egzaktne aritmetike za analizu grešaka.

Širenje grešaka zaokruživanja (nastavak)

Ne zaboravimo još da ε ovdje ovisi o x , y , i operaciji \circ . Kad takvih operacija ima više, pripadne greške obično označavamo nekim indeksom u ε .

Na primjer, ako je \circ zbrajanje (+), onda je

$$\begin{aligned} fl(x + y) &= (1 + \varepsilon_{x+y}) (x + y) \\ &= [(1 + \varepsilon_{x+y}) x] + [(1 + \varepsilon_{x+y}) y], \end{aligned}$$

uz $|\varepsilon_{x+y}| \leq u$, ako su x , y i $x + y$ u prikazivom rasponu.

Potpuno ista stvar vrijedi i za oduzimanje.

Kod množenja i dijeljenja možemo birati kojem ulaznom podatku ćemo “zalijepiti” faktor $(1 + \varepsilon)$.

Širenje grešaka zaokruživanja (nastavak)

Za **množenje** možemo pisati

$$\begin{aligned} fl(x * y) &= (1 + \varepsilon_{x*y}) (x * y) \\ &= [(1 + \varepsilon_{x*y}) x] * y = x * [(1 + \varepsilon_{x*y}) y], \end{aligned}$$

a za **dijeljenje**

$$\begin{aligned} fl(x / y) &= (1 + \varepsilon_{x/y}) (x / y) \\ &= [(1 + \varepsilon_{x/y}) x] / y = x / [y / (1 + \varepsilon_{x/y})]. \end{aligned}$$

Postoje i druge varijante. Na primjer, da svakom operandu “zalijepimo” $\sqrt{1 + \varepsilon}$ (odnosno $1/\sqrt{1 + \varepsilon}$), ali to **nije** naročito važno. **Bitno** je samo da je **izračunati** rezultat **egzaktan** za malo perturbirane podatke.

Širenje grešaka (bilo kojih)

Zasad **nije vidljivo** koja je točno **korist** od ove interpretacije. Stvar se **bolje** vidi tek kad imamo **više operacija zaredom**.

Međutim, ova ideja s “**malo pogrešnim podacima**” je

- baš ono što nam **treba** za **analizu širenja grešaka**,
- i to bez obzira na uzrok grešaka, čim se sjetimo da
- rezultati **ranijih** operacija
- s nekom **greškom** **ulaze** u **nove** operacije.

Naime, **uzroka** grešaka može biti mnogo, ovisno o tome što računamo. Od grešaka **modela** i **metode**, preko grešaka **mjerenja** (u ulaznim podacima), do grešaka **zaokruživanja** (ali to je tema za **Numeričku matematiku**).

Širenje grešaka u aritmetici

Za analizu širenja grešaka u aritmetici, treba pogledati

- što se događa s greškama u rezultatu,
- kad imamo greške u operandima.

Prvo u egzaktnoj aritmetici, a onda i u aritmetici računala.

Pretpostavimo onda da su polazni podaci (ili operandi) x i y malo perturbirani, s pripadnim relativnim greškama ε_x i ε_y .

Koje su operacije opasne (ako takvih ima), ako nam je aritmetika egzaktna, a operandi su $x(1 + \varepsilon_x)$ i $y(1 + \varepsilon_y)$?

Treba ocijeniti relativnu grešku ε_o rezultata operacije \circ

$$(x \circ y)(1 + \varepsilon_o) := [x(1 + \varepsilon_x)] \circ [y(1 + \varepsilon_y)].$$

Širenje grešaka u aritmetici (nastavak)

Naravno, za početak, moramo nešto **pretpostaviti** o ε_x i ε_y .

Što smatramo **malom** relativnom perturbacijom?

- Svakako **mora** biti $|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y| < 1$, inače perturbacijom **gubimo predznak** operanda.

Međutim, to nije dovoljno za neki razuman rezultat.

- Stvarno **očekujemo** $|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y| \leq c \ll 1$, tako da imamo barem **nekoliko točnih znamenki** u perturbiranim operandima. Na pr., $c = 10^{-1}$ (jedna točna znamenka).
- **Idealno**, u računalu je $|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y| \leq u$, tj. kao da smo oba operanda **samo spremili u memoriju** računala (jedna greška zaokruživanja).

Širenje grešaka kod množenja

Množenje je bezopasno (benigno), jer vrijedi

$$\begin{aligned}(x * y) (1 + \varepsilon_*) &:= [x (1 + \varepsilon_x)] * [y (1 + \varepsilon_y)] \\ &= xy (1 + \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_x \varepsilon_y),\end{aligned}$$

kad stvar napišemo bez nepotrebnih zagrada i *. Onda je

$$\varepsilon_* = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_x \varepsilon_y \approx \varepsilon_x + \varepsilon_y,$$

ako su $|\varepsilon_x|$ i $|\varepsilon_y|$ dovoljno mali da $\varepsilon_x \varepsilon_y$ možemo zanemariti.

Dakle, relativna greška se samo zbraja.

U idealnom slučaju $|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y| \leq u$, dobivamo približnu ocjenu relativne greške $|\varepsilon_*| \leq 2u$ (do na u^2), ili, na pr., $|\varepsilon_*| \leq 2.01u$.

Širenje grešaka kod dijeljenja

Dijeljenje je, također, bezopasno (benigno), samo je zaključak malo dulji. Na početku je

$$(x / y) (1 + \varepsilon_{/}) := [x (1 + \varepsilon_x)] / [y (1 + \varepsilon_y)] = \frac{x (1 + \varepsilon_x)}{y (1 + \varepsilon_y)}.$$

Ako su $|\varepsilon_x|$ i $|\varepsilon_y|$ dovoljno mali da sve možemo linearizirati (tj. zanemariti “kvadratne” i više potencije epsilon), onda je

$$\frac{1}{1 + \varepsilon_y} = 1 - \varepsilon_y + \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \varepsilon_y^n \approx 1 - \varepsilon_y$$

i

$$(1 + \varepsilon_x) (1 - \varepsilon_y) = 1 + \varepsilon_x - \varepsilon_y - \varepsilon_x \varepsilon_y \approx 1 + \varepsilon_x - \varepsilon_y.$$

Širenje grešaka kod dijeljenja (nastavak)

Kad to uvrstimo u prvi izraz, dobivamo

$$(x / y) (1 + \varepsilon_{/}) \approx \frac{x}{y} (1 + \varepsilon_x) (1 - \varepsilon_y) \approx \frac{x}{y} (1 + \varepsilon_x - \varepsilon_y).$$

Za relativnu grešku (približno) vrijedi

$$\varepsilon_{/} \approx \varepsilon_x - \varepsilon_y, \quad |\varepsilon_{/}| \approx |\varepsilon_x| + |\varepsilon_y|.$$

Dakle, relativne greške se oduzimaju, a ocjene zbrajaju.

U idealnom slučaju $|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y| \leq u$, opet dobivamo približnu ocjenu relativne greške $|\varepsilon_{/}| \leq 2u$.

Vidimo da su i množenje i dijeljenje bezopasne operacije za širenje grešaka zaokruživanja.

Širenje grešaka kod zbrajanja i oduzimanja

Zbrajanje i oduzimanje. Ovdje rezultat ključno ovisi o predznacima od x i y .

Sasvim općenito, neka su x i y proizvoljnih predznaka. Za zbrajanje i oduzimanje (oznaka \pm) vrijedi

$$(x \pm y) (1 + \varepsilon_{\pm}) := [x (1 + \varepsilon_x)] \pm [y (1 + \varepsilon_y)].$$

Pogledajmo prvo trivijalne slučajeve. Ako je egzaktan rezultat $x \pm y = 0$, onda imamo dvije mogućnosti.

- Ako je $x (1 + \varepsilon_x) \pm y (1 + \varepsilon_y) = 0$, relativna greška ε_{\pm} može biti koji broj (nije određena), a prirodno je uzeti $\varepsilon_{\pm} = 0$.
- U protivnom, za $x (1 + \varepsilon_x) \pm y (1 + \varepsilon_y) \neq 0$, gornja jednakost je nemoguća, pa stavljamo $\varepsilon_{\pm} = \pm\infty$.

Širenje grešaka kod zbrajanja i oduzimanja

Pretpostavimo nadalje da je $x \pm y \neq 0$. Onda je

$$\begin{aligned}(x \pm y)(1 + \varepsilon_{\pm}) &= x(1 + \varepsilon_x) \pm y(1 + \varepsilon_y) \\ &= (x \pm y) + (x\varepsilon_x \pm y\varepsilon_y) \\ &= (x \pm y) \left(1 + \frac{x\varepsilon_x \pm y\varepsilon_y}{x \pm y} \right).\end{aligned}$$

Relativnu grešku ε_{\pm} možemo napisati u obliku **linearne kombinacije** polaznih grešaka ε_x i ε_y

$$\varepsilon_{\pm} = \frac{x\varepsilon_x \pm y\varepsilon_y}{x \pm y} = \frac{x}{x \pm y} \varepsilon_x \pm \frac{y}{x \pm y} \varepsilon_y.$$

Širenje grešaka kod zbrajanja i oduzimanja

Naravno, za nastavak rasprave **ključno** je pitanje

- koliko su **veliki faktori** uz polazne greške, tj. da li “**prigušuju**” ili “**napuhavaju**” greške.

Da ne bismo stalno pisali hrpu oznaka \pm (nepregledno), pogledajmo što se zbiva kad

- x i y imaju **isti** predznak, a
- **posebno** gledamo operacije $+$ i $-$.

Ako su x i y **različitih** predznaka, zamijenimo operaciju u suprotnu ($+$ \mapsto $-$, $-$ \mapsto $+$), pa će vrijediti isti zaključci.

Nadalje, zbrajamo i oduzimamo brojeve **istih** predznaka.

Širenje grešaka kod zbrajanja

Zbrajanje brojeva istog predznaka je bezopasno (benigno). To izlazi ovako.

Zbog istih predznaka od x i y , vrijedi $|x|, |y| \leq |x + y|$, pa je

$$\left| \frac{x}{x + y} \right|, \left| \frac{y}{x + y} \right| \leq 1.$$

To vrijedi i kad je $x = 0$ ili $y = 0$. Odavde odmah slijedi

$$|\varepsilon_+| \leq |\varepsilon_x| + |\varepsilon_y|.$$

Dakle, relativna greška se, u najgorem slučaju, zbraja.

U idealnom slučaju $|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y| \leq u$, opet dobivamo ocjenu relativne greške $|\varepsilon_+| \leq 2u$.

Širenje grešaka kod zbrajanja (nastavak)

Uz malo truda, dobivamo i **bolju** ocjenu. Prvo uočimo da za faktore vrijedi

$$\left| \frac{x}{x+y} \right| + \left| \frac{y}{x+y} \right| = 1,$$

i još iskoristimo $|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y| \leq \max\{|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y|\}$. Onda je

$$\begin{aligned} |\varepsilon_+| &\leq \left| \frac{x}{x+y} \right| |\varepsilon_x| + \left| \frac{y}{x+y} \right| |\varepsilon_y| \\ &\leq \left(\left| \frac{x}{x+y} \right| + \left| \frac{y}{x+y} \right| \right) \max\{|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y|\} \\ &= \max\{|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y|\}. \end{aligned}$$

Širenje grešaka kod zbrajanja (nastavak)

Dakle, relativna greška zbrajanja je, u najgorem slučaju,

• **maksimum** polaznih grešaka (ne treba ih zbrajati).

U idealnom slučaju $|\varepsilon_x|, |\varepsilon_y| \leq u$, sada dobivamo ocjenu relativne greške $|\varepsilon_+| \leq u$. Bolje ne može!

Naravno, isto vrijedi i za **oduzimanje** brojeva **različitih** predznaka. I to je **bezopasno**.

Širenje grešaka kod oduzimanja

Oduzimanje brojeva istog predznaka može biti opasno, čak katastrofalno loše.

● Točnije, ne mora uvijek biti opasno, ali može!

Zašto i kada je opasno?

Zbog različitih predznaka od x i y , uz $x \neq 0$ i $y \neq 0$, sigurno vrijedi

$$|x - y| < \max\{|x|, |y|\},$$

pa je barem jedan od faktora veći od 1, tj.

$$\max\left\{\left|\frac{x}{x-y}\right|, \left|\frac{y}{x-y}\right|\right\} > 1.$$

Širenje grešaka kod oduzimanja (nastavak)

Odavde odmah slijedi da u ocjeni relativne greške

$$|\varepsilon_-| \leq \left| \frac{x}{x-y} \right| |\varepsilon_x| + \left| \frac{y}{x-y} \right| |\varepsilon_y|$$

na barem **jednom** mjestu imamo **rast** greške, a to se može dogoditi i na **oba** mjesta.

Kad je to **zaista opasno**? Ako je $|x-y| \ll |x|, |y|$, ovi faktori

$$\left| \frac{x}{x-y} \right|, \quad \left| \frac{y}{x-y} \right|,$$

mogu biti **proizvoljno veliki**, pa i relativna greška $|\varepsilon_-|$ rezultata može biti **proizvoljno velika**!

Opasno oduzimanje ili kraćenje

Opasna situacija $|x - y| \ll |x|, |y|$ znači da je

- rezultat oduzimanja brojeva istog predznaka =
- broj koji je po apsolutnoj vrijednosti mnogo manji od polaznih podataka (oba operanda),

a to znači da operandi x i y moraju biti bliski, tako da dolazi do kraćenja. Zato se ovaj fenomen obično zove

Opasno ili katastrofalno kraćenje.

Dosad smo govorili da relativna greška u tom slučaju može biti velika, ali da li se to zaista događa?

- Naime, ovdje je ipak riječ o ocjeni greške, pa se možda događa da je ocjena vrlo loša, a prava greška ipak mala!

Nažalost, nije tako! To se itekako događa u praksi!

Primjer: “Katastrofalno” kraćenje

Primjer katastrofalnog kraćenja

Zakruživanjem ulaznih podataka dolazi do male relativne greške. Kako ona može utjecati na konačan rezultat?

Primjer. Uzmimo realnu aritmetiku “računala” u bazi 10. Za mantisu (značajni dio broja) imamo $p = 4$ dekadске znamenke, a za eksponent 2 znamenke (što nije bitno). Neka je

$$\begin{aligned}x &= 8.8866 = 8.8866 \times 10^0, \\y &= 8.8844 = 8.8844 \times 10^0.\end{aligned}$$

Umjesto brojeva x i y , koji nisu prikazivi, u “memoriju” spremamo brojeve $fl(x)$ i $fl(y)$, pravilno zaokružene na $p = 4$ znamenke

$$\begin{aligned}fl(x) &= 8.887 \times 10^0, \\fl(y) &= 8.884 \times 10^0.\end{aligned}$$

Primjer katastrofalnog kraćenja (nastavak)

Ovim zaokruživanjima napravili smo **malu** relativnu grešku u x i y (ovdje je $u = \frac{1}{2} b^{-p} = 5 \times 10^{-5}$).

Razliku $fl(x) - fl(y)$ računamo tako da **izjednačimo eksponente** (što već jesu), **oduzmemo** značajne dijelove (mantise), pa **normaliziramo**

$$\begin{aligned} fl(x) - fl(y) &= 8.887 \times 10^0 - 8.884 \times 10^0 \\ &= 0.003 \times 10^0 = 3.??? \times 10^{-3}. \end{aligned}$$

Kod normalizacije, zbog pomaka “**ulijevo**”, pojavljuju se

● **?** = znamenke koje više **ne možemo** restaurirati (ta informacija se **izgubila**).

Što sad?

Primjer katastrofalnog kraćenja (nastavak)

Računalo radi **isto** što bismo i mi napravili:

na ta mjesta ? upisuje 0.

Razlog: da rezultat bude **točan**, ako su **polazni** brojevi **točni**. Dakle, ovo oduzimanje je **egzaktno** i u aritmetici računala.

Konačni **izračunati** rezultat je $fl(x) - fl(y) = 3.000 \times 10^{-3}$.

Pravi rezultat je

$$\begin{aligned}x - y &= 8.8866 \times 10^0 - 8.8844 \times 10^0 \\ &= 0.0022 \times 10^0 = 2.2 \times 10^{-3}.\end{aligned}$$

Već **prva** značajna znamenka u $fl(x) - fl(y)$ je **pogrešna**, a relativna greška je **ogromna**! Uočite da je ta znamenka (**3**), ujedno, i **jedina** koja nam je ostala — sve ostalo se **skratilo**!

Primjer katastrofalnog kraćenja (nastavak)

Prava **katastrofa** se događa ako $3.??? \times 10^{-3}$ uđe u naredna zbrajanja (oduzimanja), a onda se **skrati** i ta **trojka!**

Uočite da je **oduzimanje** $fl(x) - fl(y)$ bilo **egzaktno** i u aritmetici našeg “**računala**”, ali **rezultat je**, svejedno, **pogrešan**.

Krivac, očito, **nije oduzimanje** (kad je egzaktno).

- Uzrok su **polazne greške** u operandima.

Ako njih **nema**, tj. ako su polazni operandi **egzaktni**,

- i dalje, naravno, dolazi do **kraćenja**,

- ali je **rezultat** (uglavnom, a po IEEE standardu **sigurno**) **egzaktan**,

pa se ovo kraćenje onda zove **benigno kraćenje**.

Širenje grešaka u aritmetici računala

Dosad smo gledali širenje grešaka u egzaktnoj aritmetici.

U aritmetici računala postupamo na potpuno isti način. Samo treba zgodno iskoristiti onu raniju interpretaciju da je

- izračunati (ili “zaokruženi”) rezultat jednak egzaktnom, ali za malo perturbirane podatke (u relativnom smislu).

A širenje grešaka u egzaktnoj aritmetici znamo.

Ukratko, bez dokaza:

Svaka pojedina aritmetička operacija u računalu samo

- povećava perturbaciju svojih ulaznih podataka za jedan faktor oblika $(1 + \varepsilon)$, uz ocjenu $|\varepsilon| \leq u$,

ovisno o tome kojim operandima “zalijepimo” taj faktor.

Širenje grešaka u aritmetici računala — primjer

Primjer. Računamo zbroj $\hat{x} + \hat{y}$, gdje su \hat{x} i \hat{y} spremljeni u računalu i već imaju neku grešku, nastalu spremanjem pravih vrijednosti x i y u memoriju računala i eventualnim ranijim računom. Znamo da za izračunati rezultat vrijedi

$$fl(\hat{x} + \hat{y}) = (1 + \varepsilon_+) (\hat{x} + \hat{y}) = (1 + \varepsilon_+) \hat{x} + (1 + \varepsilon_+) \hat{y},$$

uz $|\varepsilon_+| \leq u$, ako su \hat{x} , \hat{y} i $\hat{x} + \hat{y}$ u prikazivom rasponu.

No, \hat{x} i \hat{y} već imaju neke relativne greške obzirom na prave egzaktno vrijednosti x i y

$$\hat{x} = (1 + \varepsilon_x)x, \quad \hat{y} = (1 + \varepsilon_y)y,$$

i to treba uvrstiti u gornju formulu.

Širenje grešaka u aritmetici računala — primjer

Dobivamo da je

$$\begin{aligned} fl(\hat{x} + \hat{y}) &= (1 + \varepsilon_+) (\hat{x} + \hat{y}) \\ &= (1 + \varepsilon_+) (1 + \varepsilon_x) x + (1 + \varepsilon_+) (1 + \varepsilon_y) y. \end{aligned}$$

Drugim riječima, **izračunati** rezultat $fl(\hat{x} + \hat{y})$ se opet može interpretirati kao **egzaktni** rezultat,

• ali na “**malo više**” perturbiranim polaznim podacima

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= (1 + \eta_x)x = (1 + \varepsilon_+) (1 + \varepsilon_x)x, \\ \tilde{y} &= (1 + \eta_y)y = (1 + \varepsilon_+) (1 + \varepsilon_y)y. \end{aligned}$$

Relativne greške η_x i η_y su tzv. “greške **unatrag**” ili “**obratne greške**” — jer se odnose na perturbaciju **ulaza** (uz **egzaktno** računanje).

Širenje grešaka u aritmetici računala — primjer

Nažalost, prethodne formule **ne daju** neku informaciju o tome

• koliko je **izračunati** rezultat “daleko” od **pravog** rezultata, a upravo to je ono što nas **stvarno zanima**.

• Ovo je tzv. “greška **unaprijed**”, jer mjeri “perturbaciju” rezultata, tj. **izlaza** (uz **približno** računanje).

Zadatak. Nađite relativnu grešku **unaprijed** η_+ u izračunatom rezultatu

$$fl(\hat{x} + \hat{y}) = (1 + \eta_+) (x + y),$$

u terminima **ulaznih** podataka x i y , te grešaka ε_x , ε_y i ε_+ .

Zaključak. Greška **unaprijed** se **puno teže** računa od grešaka **unatrag**! Zato se obično nalazi “zaobilaznim” putem.

Natuknice o analizi grešaka

Bilo koji **algoritam** gledamo kao **preslikavanje**:

ulaz (domena) \rightarrow izlaz (kodomena).

Naravno, zanima nas

- **greška** u izračunatom **rezultatu** — u kodomeni,
- uz **približno** računanje aritmetikom računala.

Ova greška zove se greška **unaprijed** (engl. forward error).

Nažalost, postupak “**direktne**” analize grešaka je **težak**,

- relativno **rijetko** “ide” i često daje **loše** ocjene greške.

Primjer. Obična **norma** vektora u \mathbb{R}^2 (i još dodaj “scaling”).
(v. **Z. Drmač**, članak u **MFL-u**).

Natuknice o analizi grešaka (nastavak)

U praksi se puno češće koristi tzv. “**obratna**” analiza grešaka. Osnovna ideja je **ista** kao i za **pojedine** operacije:

- izračunati **rezultati** algoritma mogu se dobiti **egzaktnim** računanjem,
- ali na **perturbiranim ulaznim** podacima — u domeni.

Ova greška u domeni zove se greška **unatrag** ili **obratna** greška (engl. backward error).

Prednost: ocjena tih perturbacija u **domeni** je bitno **lakša**,

- jer se **akumulacija** onih faktora oblika $(1 + \varepsilon)$ **prirodno** radi **unatrag** — od **rezultata** prema **polaznim podacima**.

U protivnom, moramo **znati** grešku za **operande**, a to je greška **unaprijed** za prethodni dio algoritma.

Natuknice o analizi grešaka (nastavak)

Postupak “unatrag” za nalaženje grešaka u izračunatim rezultatima ide u dva koraka.

- Prvo se obratnom analizom naprave ocjene perturbacija polaznih podataka u domeni,
- a zatim se koristi matematička teorija perturbacije, koja daje ocjene grešaka rezultata u kodomeni. Ovaj izvod ide za egzaktni račun, pa vrijede sva normalna pravila.

Tako stižemo do pojmova:

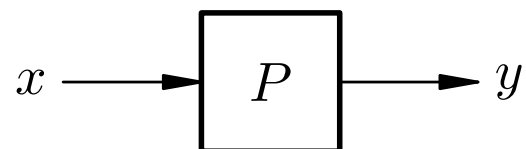
- stabilno i nestabilno računanje ili algoritam = “prigušivač” ili “pojačalo” grešaka.

Slikice (skripta NA, Higham) — su na sljedećoj stranici.

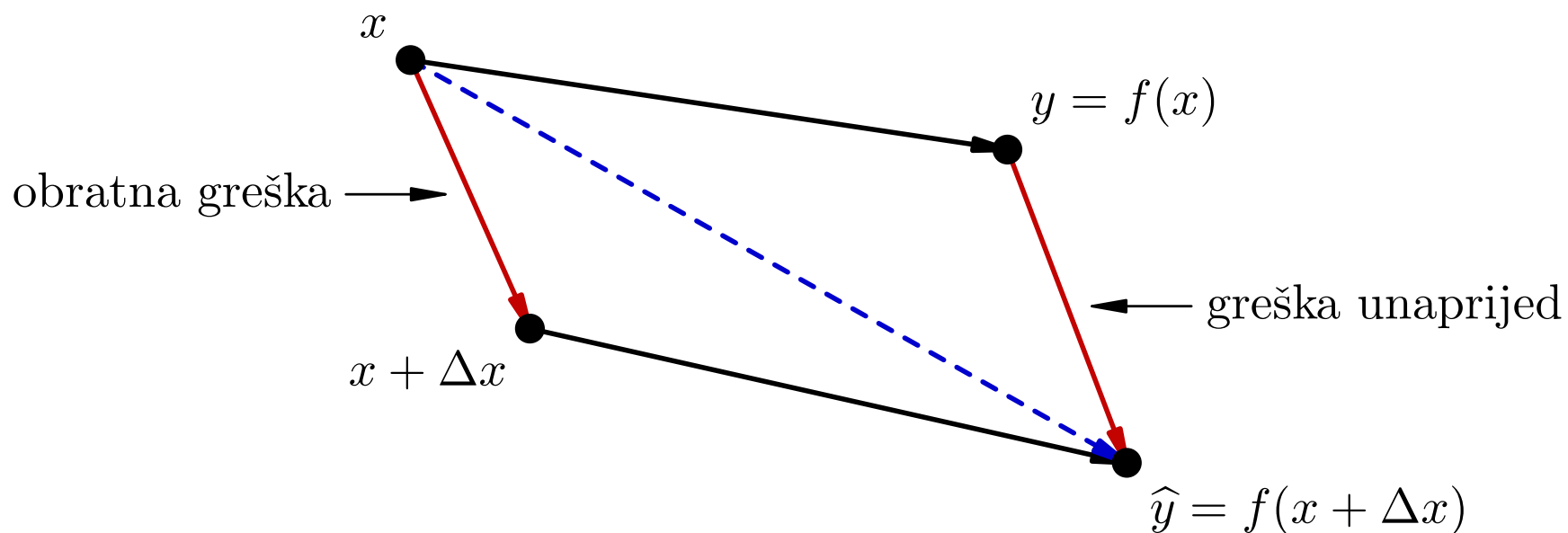
- Primjeri nestabilnosti — uklonjivi i NEuklonjivi.

Greška unaprijed i obratna greška

Uzmimo da **algoritam** “rješava” problem P .



Ako problem P intepretiramo kao **računanje** funkcije f , onda grešku **unaprijed** i **obratnu** grešku možemo prikazati ovako:



Dodatna literatura za floating point aritmetiku

Ako želite saznati još ponešto o **floating-point prikazu** brojeva i **aritmetici**, pogledajte/potražite članke:

- **David Goldberg**, **What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic**, ACM Computing Surveys, Vol. 23, No. 1, March 1991, pp. 5–48.
- **Zlatko Drmač**, **Numerička matematika i računala**, MFL 4/196, Zagreb, 1999., str. 212–219.

i već spomenutu **Highamovu** knjigu.

Zbog “copyrighta”, ovo **nije** na mom webu, ali možete **dobiti**, ako želite.

Primjer: Kvadratna jednadžba

Kvadratna jednadžba

Uzmimo da treba riješiti (realnu) kvadratnu jednadžbu

$$ax^2 + bx + c = 0,$$

gdje su a , b i c zadani, i vrijedi $a \neq 0$.

Matematički gledano, problem je lagan: imamo 2 rješenja

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

Numerički gledano, problem je mnogo izazovniji:

- ni uspješno računanje po ovoj formuli,
- ni točnost izračunatih korijena,

ne možemo uzeti “zdravo za gotovo”.

Kvadratna jednadžba — standardni oblik

Za početak, jer znamo da je $a \neq 0$, onda jednadžbu možemo **podijeliti** s a , tako da dobijemo tzv. “**normalizirani**” oblik

$$x^2 + px + q = 0, \quad p = \frac{b}{a}, \quad q = \frac{c}{a}.$$

Po standardnim formulama, rješenja ove jednadžbe su

$$x_{1,2} = \frac{-p \pm \sqrt{p^2 - 4q}}{2}.$$

Međutim, u praksi, stvarno **računanje** se radi po formuli

$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q},$$

s tim da na početku izračunamo i **zapamtimo** $p/2$ ili $-p/2$.

Ovim postupkom **štedimo** jedno množenje (ono s 4).

Kvadratna jednadžba — problem

Primjer. Rješavamo kvadratnu jednadžbu $x^2 - 56x + 1 = 0$.

U dekadskoj aritmetici s $p = 5$ značajnih znamenki dobijemo

$$x_1 = 28 - \sqrt{783} = 28 - 27.982 = 0.018000,$$

$$x_2 = 28 + \sqrt{783} = 28 + 27.982 = 55.982.$$

Točna rješenja su

$$x_1 = 0.0178628\dots \quad \text{i} \quad x_2 = 55.982137\dots$$

Apsolutno **manji** od ova dva korijena — x_1 , ima **samo dvije** točne znamenke (**kraćenje**), relativna greška je $7.7 \cdot 10^{-3}$!

Apsolutno veći korijen x_2 je “savršeno” **točan**.

Kvadratna jednadžba — popravak

Prvo izračunamo **većeg** po apsolutnoj vrijednosti, po formuli

$$x_2 = \frac{-(b + \text{sign}(b)\sqrt{b^2 - 4ac})}{2a} = -\frac{p}{2} - \text{sign}(p)\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q},$$

a **manjeg** po apsolutnoj vrijednosti, izračunamo iz

$$x_1 \cdot x_2 = \frac{c}{a} = q$$

(Vieta), tj. formula za x_1 je

$$x_1 = \frac{c}{x_2 a} = \frac{q}{x_2}.$$

Opasnog **kraćenja** za x_1 više **nema!**

Kvadratna jednadžba (nastavak)

Ovo je bila samo **jedna**, od (barem) **tri** “opasne” točke za računanje. Preostale **dvije** su:

- “kvadriranje” pod korijenom — mogućnost za **overflow**.
Rješenje — “skaliranjem”.
- **oduzimanje** u diskriminanti (**kraćenje**) — **nema** jednostavnog rješenja. Naime, “krivac” **nije** aritmetika.
 - To je samo odraz tzv. **nestabilnosti** problema, jer tad imamo **dva bliska korijena** koji su **vrlo osjetljivi** na male **perturbacije** koeficijenata jednadžbe.
 - Na primjer, pomak c = pomak grafa “**gore–dolje**”. **Mali** pomak rezultira **velikom** promjenom korijena!

Primjeri izbjegavanja kraćenja

Neki primjeri izbjegavanja kraćenja

Primjer. Treba izračunati

$$y = \sqrt{x + \delta} - \sqrt{x},$$

gdje su x i δ zadani ulazni podaci, s tim da je $x > 0$,

• a $|\delta|$ vrlo mali broj.

U ovoj formuli, očito, dolazi do velike greške zbog kraćenja — zaokruživanje korijena prije oduzimanja.

Ako formulu “deracionaliziramo” u oblik

$$y = \frac{\delta}{\sqrt{x + \delta} + \sqrt{x}},$$

problema više nema!

Neki primjeri izbjegavanja kraćenja

Primjer. Treba izračunati

$$y = \cos(x + \delta) - \cos x,$$

gdje su x i δ zadani **ulazni** podaci, s tim da je $|\cos x|$ razumno velik,

• a $|\delta|$ **vrlo mali** broj.

Opet, dolazi do **velike greške** zbog **kraćenja**.

Ako formulu napišmo u “**produktnom**” obliku

$$y = -2 \sin \frac{\delta}{2} \sin \left(x + \frac{\delta}{2} \right),$$

problema više **nema!**

Šírenje grešaka — zaključak

Opasne i bezopasne operacije — sažetak

Jedina opasna operacija — kad rezultat može imati veliku relativnu grešku, je

- oduzimanje bliskih brojeva,
- i to samo kad polazni operandi već imaju neku grešku (samo oduzimanje je tada, najčešće, egzaktno).

Ovaj fenomen zove se opasno ili katastrofalno kraćenje.

Sve ostale operacije su bezopasne — relativna greška rezultata ne raste pretjerano. Posebno,

- dijeljenje malim brojem nije opasno,
- osim kad je mali broj nastao (ranijim) kraćenjem.

Nažalost, u nekim knjigama piše suprotno — i pogrešno.