

Obsah

1 Úvod	17
2 Základy teorie chyb měření	19
2.1 Chyby měření	19
2.1.1 Omyly a hrubé chyby	20
2.1.2 Chyby nevyhnutelné (náhodné a systematické)	20
2.2 Zákonitosti náhodných chyb. Elementární chyby, základní a výběrové míry přesnosti, mezní chyba	22
2.2.1 Charakteristiky náhodných veličin.....	22
2.2.1.1 Charakteristiky polohy	24
2.2.1.2 Charakteristiky proměnlivosti.....	24
2.2.1.3 Charakteristiky šikmosti a špičatosti.....	25
2.2.2 Elementární chyby	25
2.2.3 Základní soubor chyb.....	26
2.2.4 Přesnost měření a základní střední chyba.....	27
2.2.5 Úplná chyba a úplná střední chyba	28
2.2.6 Průměrná a pravděpodobná chyba	30
2.2.7 Parametry základního souboru chyb a mezní chyba.....	31
2.2.8 Střední chyba empirické střední chyby	32
2.3 Některá rozdělení náhodných veličin.	33
2.3.1 Binomické rozdělení	34
2.3.2 Normální rozdělení (Laplace – Gaussovo)	34
2.3.3 Rozdělení χ^2	36
2.3.4 Studentovo t -rozdělení.....	37
2.3.5 Rozdělení F (Snedecorovo - Fisherovo)	38
2.3.6 Rozdělení některých výběrových funkcí ve výběru z $N(E(x);\sigma^2)$	39
2.4 Intervalové odhady	40
2.4.1 Bodový a intervalový odhad	41
2.4.1.1 Bodový odhad	41
2.4.1.2 Intervalový odhad	41
2.4.2 Konstrukce intervalů spolehlivosti	42
2.4.3 Interval spolehlivosti pro parametry normálního rozdělení	42
2.4.3.1 Interval spolehlivosti pro střední hodnotu $E(x)=X$ základního souboru.	42
2.4.3.2 Interval spolehlivosti pro varianci σ^2 základního souboru.....	43
2.5 Vícerozměrná náhodná veličina	45
2.5.1 Charakteristiky vícerozměrné náhodné veličiny	46
2.5.2 Vícerozměrné normální rozdělení	47
2.6 Rozdělení vícerozměrných chyb	48
2.6.1 Chyby jednorozměrné	48

2.6.2	Chyby dvojrozměrné.....	49
2.6.2.1	Hustota pravděpodobnosti pro celý obvod elipsy chyb	51
2.6.2.2	Kružnice chyb	53
2.6.2.3	Pravděpodobnost chyb v mezích 0 až t	53
2.6.2.4	Stočené soustavy chybových souřadnic x, y	55
2.6.2.5	Elipsa chyb v případě vyrovnání zprostředkujících měření	56
2.6.2.6	Helmertova křivka	57
2.6.3	Zákon rozdělení chyb v prostoru	58
2.7	Zákon hromadění skutečných a středních chyb	61
2.7.1	Skutečná chyba funkce měřených veličin.....	61
2.7.2	Přesnost počítání a ekonomické měření	63
2.7.3	Zákon hromadění středních chyb	63
2.7.4	Zákon hromadění vah	67
2.7.5	Zákon hromadění chyb při působení systematických chyb.....	68
2.7.5.1	Případ konstantní chyby	68
2.7.5.2	Případ skupinové chyby.	68
3	Vyrovnání měření obecně	73
3.1	Metody vyrovnání	73
4	Metoda nejmenších čtverců	75
4.1	Váhy měření	75
4.2	Formulace vyrovnávacích úloh	76
4.3	Vyrovnání přímých měření	76
4.3.1	Aritmetický a obecný průměr	76
4.3.1.1	Formulace úlohy	76
4.3.1.2	Postup řešení.	77
4.3.2	Střední chyba obecného průměru.....	77
4.3.3	Výpočet empirických středních chyb z oprav	78
4.3.4	Postup vyrovnání měření přímých	79
4.3.5	Zdůvodnění aritmetického a obecného průměru	80
4.3.6	Dvojice měření.....	81
4.3.6.1	Soubor dvojic stejné váhy	81
4.3.6.2	Soubor dvojic různé váhy	82
4.4	Vyrovnání zprostředkujících měření	84
4.4.1	Formulace úlohy	84
4.4.2	Postup řešení	84
4.4.3	Kontroly	86
4.4.4	Střední chyby	87
4.4.4.1	Odhad jednotkové střední chyby.....	87
4.4.4.2	Střední chyby vyrovnaných neznámých	89
4.4.4.3	Střední chyba funkce vyrovnaných neznámých.....	89

4.4.4.4	Střední chyba vyrovnaného měření.....	90
4.4.4.5	Střední chyby oprav určených z vyrovnání	90
4.4.5	Přehled postupu vyrovnání.	91
4.4.6	Speciální případy.....	95
4.4.6.1	Vyrovnaní různorodých měření	95
4.4.6.2	Chybná volba počtu neznámých	95
4.4.7	Uplatnění chyb ve výchozích (daných) veličinách	96
4.4.8	Eliminace neznámých	97
4.4.9	Sekvenční vyrovnání	98
4.5	Vyrovnaní podmínkových měření.....	103
4.5.1	Formulace úlohy	103
4.5.2	Postup řešení	103
4.5.3	Vyrovnaní pomocí korelát	104
4.5.4	Kontroly	105
4.5.4.1	Kontrola linearizace podmínkových rovnic.....	105
4.5.4.2	Závěrečná kontrola	106
4.5.5	Střední chyby	106
4.5.5.1	Střední chyba jednotková	106
4.5.5.2	Střední chyby vyrovnaných veličin a jejich funkcí.....	106
4.5.6	Přehled postupu vyrovnání	108
4.5.7	Speciální případy.....	110
4.5.7.1	Nesprávný počet podmínkových rovnic	110
4.5.7.2	Vyrovnaní různorodých veličin	110
4.5.7.3	Vyrovnaní měření s daným součtem	110
4.5.7.4	Ekvivalentní měření	112
4.6	Kombinované vyrovnání	113
4.6.1	Vyrovnaní zprostředkujících měření s podmínkami.....	113
4.6.2	Vyrovnaní podmínkových měření s neznámými	114
4.7	Vyrovnaní korelovaných měření. Obecný model vyrovnání a přehledy vzorců.....	115
4.7.1	Zákon hromadění vah pro korelovaná měření.....	117
4.7.2	Určení matice Q_f	117
4.7.3	Volba metody vyrovnání a vliv zanedbání korelace mezi měřeními na výsledky vyrovnání.....	118
4.7.4	Obecný model vyrovnání a přehled vzorců pro jeho speciální případy.....	118
4.7.4.1	Vyrovnaní měření zprostředkujících	120
4.7.4.2	Vyrovnaní měření podmínkových	121
4.7.4.3	Vyrovnaní měření podmínkových s neznámými.....	122
4.7.4.4	Vyrovnaní měření zprostředkujících s podmínkami pro neznámé.....	123
5	Metody robustního odhadu	125
5.1	Třídy odhadů robustní statistiky	125

5.2	M-odhady.....	125
5.2.1	Huberův M-odhad	129
5.2.2	Odhady pomocí L_p – normy	131
5.2.3	Generalizované M-odhady	132
5.3	Přehled používaných M-odhadů.....	132
5.3.1	Huberův odhad	132
5.3.2	Modifikovaný Huberův odhad.....	133
5.3.3	Hampelův odhad	133
5.3.4	Talwarův odhad	134
5.3.5	Odhad Cauchyho rozdělení	135
5.3.6	Tukeyho biweight odhad	135
5.3.7	German – McClureův odhad	136
5.3.8	Andrewsův odhad.....	136
5.3.9	Welschův odhad	137
5.3.10	Fair odhad.....	137
5.3.11	L_p – norma.....	138
5.3.12	L_1 – norma.....	138
5.3.13	Hybridní L_1/L_2 – norma	139
5.3.14	Dánská metoda.....	139
5.4	LMS-odhad	139
5.5	Metoda RANSAC.....	140
5.6	Metoda redukovaných (useknutých) pozorování	141
5.6.1	Metoda useknutí (Trimming).....	141
5.6.2	Metoda Windsorizování (Windsorizing).....	141
5.7	Závěr	141
6	Metody řešení normálních rovnic	142
6.1	Výpočet inverzní matice	142
6.1.1	Jordanův algoritmus	143
6.1.2	LU rozklad	143
6.1.3	QR rozklad.....	144
6.2	Přímé řešení normálních rovnic.....	145
6.2.1	Gaussova eliminační metoda.....	145
6.2.2	Choleskyho metoda	147
6.2.3	Metoda postupné iterace.....	149
6.3	Pseudoinverze	150
6.3.1	Definice a vlastnosti pseudoinverze	150
6.3.2	Metody výpočtu pseudoinverzní matice.....	150
6.3.2.1	Rozklad na součin matic.....	151

6.3.2.2	Iterační metoda Ben-Israela a Cohena	151
6.3.2.3	Metoda využívající singulární rozklad	152
6.3.3	Využití pseudoinverze při řešení vyrovnaní MNČ.....	153
6.3.3.1	Výpočet inverzní matice pseudoinverzí	153
6.3.3.2	Přímé řešení rovnic oprav pseudoinverzí	153
6.3.3.3	Řešení inverze singulární matice normálních rovnic	154
6.4	Výběr hlavního prvku (pivoting)	154
6.4.1	Částečný výběr hlavního prvku.....	155
6.4.2	Úplný výběr hlavního prvku.....	156
7	Optimalizace geodetických sítí	157
7.1	Design 0. řádu	158
7.2	Design 1. řádu	158
7.3	Design 2. řádu	159
7.4	Design 3. řádu	159
7.5	Aplikace: Design 2.řádu	159
8	Aproximace funkčních vztahů. Regresní a korelační analýza	163
8.1	Podstata aproximace funkčních vztahů (regresní analýza)	163
8.1.1	Úvod do problematiky	163
8.1.2	Obecný postup aproximace.....	165
8.2	Vyrovňovací přímka a rovina	167
8.2.1	Měřené hodnoty y jsou zatíženy chybami.....	168
8.2.2	Měřené hodnoty x jsou zatíženy chybami.....	169
8.2.3	Obojí měřené veličiny x, y jsou zatíženy měřicími chybami	170
8.2.4	Vyrovňovací rovina	171
8.3	Aproximace funkce trigonometrickou řadou (harmonická analýza)	172
8.4	Aproximace parametricky vyjádřených funkcí.....	175
8.4.1	Určení parametrické rovnice přímky – jednokrokový algoritmus.....	176
8.4.2	Určení parametrické rovnice přímky – dvoukrokový algoritmus.....	179
8.4.3	Algoritmus pro kružnici.....	181
8.4.4	Algoritmus pro kouli	182
8.4.5	Řetězovka – jednokrokový algoritmus	183
8.4.5.1	Matematická formulace problému	184
8.4.5.2	Výpočet přibližných hodnot	186
8.4.5.3	Výpočet vyrovnaním	187
8.4.5.4	Testování postupu výpočtu.....	189
8.4.6	Řetězovka – dvoukrokový algoritmus	189
8.4.7	Požadavky a problémy výpočtu	190
8.5	Aproximace polynomem	190

8.6	Aproximace ortogonálním polynomem	191
8.7	Základy korelačního počtu. Analýza korelace	192
8.7.1	Základní pojmy.....	192
8.7.2	Koeficient korelace a analýza korelace	196
8.7.2.1	Výpočet koeficientu korelace z kovarianční matice	197
8.7.2.2	Interpretace koeficientu korelace	197
8.7.3	Testování empirického koeficientu korelace.....	198
8.7.4	Jiné druhy korelace. Pořadová (rangová) korelace	199
9	Testování statistických hypotéz.....	201
9.1	Ověření hypotézy o typu rozdělení pravděpodobnosti (testy shody) ...	201
9.1.1	Testy pro obecné rozdělení	202
9.1.1.1	Pearsonův χ^2 - test pro jeden výběr.....	202
9.1.1.2	Kolmogorovův - Smirnovův test pro jeden výběr.....	203
9.1.2	Testování normality náhodných výběrů.....	203
9.1.2.1	Test šikmosti	204
9.1.2.2	Test špičatosti	205
9.1.2.3	D'Agostinův (omnibus) test	206
9.2	Testování střední hodnoty.....	206
9.2.1	Ověřování hypotézy o střední hodnotě základního souboru s normálním rozdělením při známé základní střední chybě	206
9.2.2	Ověřování hypotézy o střední hodnotě základního souboru s normálním rozdělením při neznámé základní střední chybě	207
9.2.3	Ověření hypotézy o rovnosti středních hodnot dvou normálně rozdělených základních souborů	207
9.3	Testování střední chyby (variance)	209
9.3.1	Testování hypotézy o shodnosti výběrové a základní střední chyby	209
9.3.2	Testování hypotézy o shodnosti dvou výběrových směrodatných odchylek... 209	
9.3.3	Mezní výběrová směrodatná odchylka	210
9.3.4	Testování výběrové směrodatné odchylky pomocí normálního rozdělení..... 210	
9.4	Kritéria pro testování opakovaných měření.....	210
9.4.1	Mezní rozdíl	210
9.4.2	Testování oprav opakovaných měření od průměru	211
9.4.2.1	Jednoduchý test oprav.....	211
9.4.2.2	McKay - Nairův test oprav při známé základní střední chybě	211
9.4.2.3	Pearson-Sekharův (Grubbsův) test oprav.....	211
9.4.2.4	Testování mezní opravy pomocí střední opravy.....	212
9.4.3	Ověřování hypotézy o odlehlosti krajních měření ve výběru z normálního rozdělení.....	213
9.4.3.1	Testování variačního rozpětí.....	213
9.4.3.2	Testování krajních hodnot náhodného výběru.....	213
9.5	Ověřování hypotéz o parametrech regresních funkcí.	214

9.5.1	Individuální testy jednotlivých hodnot parametrů.....	214
9.5.2	Test hypotéz o vektoru a , nebo jeho části	214
9.5.3	Porovnání regresních funkcí ze dvou nezávislých výběrů	215
9.6	Ověření hypotéz o korelačních koeficientech	216
9.6.1	Hypotéza o existenci korelačního koeficientu ρ v základním souboru.	216
9.6.2	Hypotéza o rovnosti korelačních koeficientů $\rho_1=\rho_2$ ve dvou základních souborech.....	216
9.6.3	Hypotéza o existenci korelačního koeficientu $\rho = 0$ v základním souboru.	217
9.7	Ověření hypotézy o skupinové systematické chybě.....	217
10	Rozbory přesnosti v inženýrské geodézii	219
10.1	Rozbory před měřením	219
10.1.1	Výpočet požadované směrodatné odchylky geodetických prací.....	219
10.1.2	Jednorozměrný případ rozboru před měřením.....	220
10.1.3	Dvou a vícerozměrný případ rozboru před měřením.....	221
10.2	Rozbory při měření	222
10.3	Rozbory po měření.....	222
10.4	Volba koeficientu spolehlivosti	222
10.5	Vliv realizace, vliv přesnosti centrace a určení výšky přístroje a cíle na přesnost určených veličin	223
10.5.1	Vliv realizace na výsledky vytyčení.....	224
10.5.2	Obecný postup určení celkové přesnosti měřené veličiny.....	224
10.5.2.1	Popis přesnosti centrace a výšky cíle nebo přístroje.....	224
10.5.2.2	Výpočet vlivu centrace a určení výšky cíle nebo přístroje na měřenou veličinu	225
10.5.2.3	Výpočet vzájemných závislostí mezi veličinami měřenými na stanovisku	225
10.5.3	Vliv na přesnost měření vodorovných směrů.....	226
10.5.3.1	Vliv centrace přístroje	226
10.5.3.2	Vliv centrace cíle	227
10.5.3.3	Celkový vliv centrací na přesnost.....	227
10.5.3.4	Závislost měřených vodorovných směrů na stanovisku	228
10.5.4	Vliv na přesnost měření zenitových úhlů	229
10.5.4.1	Vliv centrace a určení výšky přístroje	229
10.5.4.2	Vliv centrace a určení výšky cíle.....	230
10.5.4.3	Celková přesnost.....	230
10.5.4.4	Závislost měřených zenitových úhlů na stanovisku.....	231
10.5.5	Vliv na přesnost měření šikmých délek	232
10.5.5.1	Vliv centrace a určení výšky přístroje	233
10.5.5.2	Vliv centrace a určení výšky cíle.....	233
10.5.5.3	Celkový vliv na přesnost.....	233
10.5.5.4	Závislost měřených šikmých délek na stanovisku.....	234
10.5.6	Vzájemná závislost různých typů měření na stanovisku	235

10.6	Praktické případy rozborů přesnosti bez vyrovnání.....	236
10.6.1	Vytyčení polohy bodu polární metodou.....	236
10.6.1.1	Vliv měření na přesnost souřadnic	237
10.6.1.2	Vliv měření na polohovou a souřadnicovou směrodatnou odchylku.....	238
10.6.1.3	Vliv podkladu na přesnost souřadnic.....	239
10.6.1.4	Vliv centrace přístroje a cíle a realizace na přesnost souřadnic.....	240
10.6.1.5	Rozbor přesnosti před měřením	241
10.6.1.6	Rozbor přesnosti při měření	242
10.6.1.7	Rozbor přesnosti po měření.....	243
10.6.2	Vytyčení úsečky polární metodou	243
10.6.2.1	Rozbor přesnosti před měřením pro rozměr úsečky	243
10.6.2.2	Rozbor přesnosti při měření pro rozměr úsečky	247
10.6.2.3	Rozbor přesnosti po měření pro rozměr úsečky.....	247
10.7	Apriorní rozbor modelováním úloh s vyrovnáním (i bez).....	248
11	Vyrovňování a analýza přesnosti geodetických sítí	250
11.1	Zpracování a analýza přesnosti měření před vyrovnáním	250
11.1.1	Hodnocení přesnosti měření z opakování.....	251
11.1.1.1	Hodnocení přesnosti vodorovných směrů.....	252
11.1.1.2	Hodnocení přesnosti zenitových úhlů	253
11.1.1.3	Hodnocení přesnosti vodorovných délek	254
11.1.2	Hodnocení přesnosti z úhlových uzávěrů.....	254
11.1.2.1	Testování velikosti úhlových uzávěrů	255
11.1.2.2	Výpočet přesnosti z úhlových uzávěrů	255
11.1.3	Hodnocení přesnosti z protisměrných měření.....	256
11.1.3.1	Testování dosažené přesnosti.....	256
11.1.3.2	Určení přesnosti z protisměrných měření	257
11.1.4	Hodnocení přesnosti z výškových uzávěrů	257
11.1.4.1	Testování dosažené přesnosti.....	258
11.1.4.2	Určení přesnosti z výškových uzávěrů	258
11.2	Vyrovňování geodetické sítě vyrovnáním měření zprostředkujících	258
11.2.1	Vázaná síť.....	259
11.2.2	Volná síť.....	262
11.2.2.1	Počet nutných parametrů pro umístění volné sítě do prostoru.....	263
11.2.2.2	Řešení pseudoinverzí	265
11.2.2.3	Volba umístění pomocí vyřazení souřadnic z vyrovnání.....	265
11.2.2.4	Volba umístění pomocí fixování souřadnic podmínkami	265
11.2.2.5	Bod a směrník	266
11.2.2.6	Helmertova transformace.....	267
11.2.3	Vázaná síť s chybami podkladu do vyrovnání.....	269
11.3	Hodnocení a posteriori přesnosti vyrovnání MNČ.....	270
11.3.1	Testování velikosti a posteriori jednotkové směrodatné odchylky	270
11.3.2	Hodnocení velikosti oprav	272

11.3.3	Hodnocení vlivu každého měření na kvalitu vyrovnaní.....	272
11.3.4	Robustní metody vyhledání hrubých chyb.....	273
11.4	Výpočet parametrů elipsoidu chyb z kovarianční matice	273
11.5	Transformace kovarianční matice souřadnic.....	273
12	Globální optimalizační algoritmy	276
12.1	Rozdělení globálních optimalizačních algoritmů	277
12.2	Pravděpodobnostní (Monte-Carlo) metody	278
12.2.1	Náhodné prohledávání.....	278
12.2.2	Horolezecký algoritmus (Hill Climbing)	279
12.2.3	Horolezecký algoritmus s náhodnými restarty (Hill Climbing with Random Restarts)	279
12.2.4	Náhodná optimalizace (Random Optimization).....	280
12.2.5	Řízené náhodné prohledávání (Controlled Random Search).....	280
12.2.6	Simulované žihání (Simulated Annealing)	280
12.3	Evoluční metody	281
12.3.1	Genetické algoritmy	281
12.3.1.1	Princip genetického algoritmu.....	281
12.3.1.2	Obecné schéma genetického algoritmu	282
12.3.1.3	Výhody a nevýhody genetických algoritmů.....	282
12.3.2	Evoluční strategie	283
12.3.2.1	Populace (1+1)	283
12.3.2.2	Populace ($\mu + 1$).....	283
12.3.2.3	Populace ($\mu + \lambda$).....	283
12.3.2.4	Populace (μ, λ).....	283
12.3.2.5	Populace ($\mu/\rho, \lambda$).....	283
12.3.2.6	Populace ($\mu/\rho + \lambda$).....	283
12.3.2.7	Populace ($\mu', \lambda'(\mu, \lambda)^\gamma$)	284
12.3.3	Diferenciální evoluce	284
12.4	Metody kolektivní inteligence (Swarm Intelligence)	284
12.4.1	Optimalizace hejnem částic (Particle Swarm Optimization)	285
12.4.2	Algoritmus SOMA (Self-Organizing Migration Algorithm)	285
12.5	Přímé vyhledávací metody	285
12.5.1	Neinformované vyhledávání (Uninformed Search).....	285
12.5.1.1	Prohledávání do šířky (Breadth-First Search)	285
12.5.1.2	Prohledávání do hloubky (Depth-First Search).....	285
12.5.1.3	Prohledávání náhodné cesty (Random Walks).....	286
12.5.2	Informované vyhledávání (Informed Search).....	286
12.5.2.1	Hladové vyhledávání (Greedy Best-First Search).....	286
12.5.2.2	Adaptivní prohledávání cesty (Adaptive Walks)	286
12.5.2.3	Simplexová metoda (Downhill Simplex)	286

13 Literatura.....	290
14 Seznam obrázků	293
15 Seznam tabulek	295
16 Přílohy	296
17 Rejstřík	306
Abstrakt.....	310
Abstract.....	311