

KAREL ZAPLATÍLEK A BOHUSLAV DOŇAR

MATLAB

ZAČÍNÁME SE SIGNÁLY

Praha 2006



Karel Zaplatílek a Bohuslav Doňar

MATLAB – začínáme se signály

Bez předchozího písemného svolení nakladatelství nesmí být kterákoli část kopírována nebo rozmnožována jakoukoli formou (tisk, fotokopie, mikrofilm nebo jiný postup), zadána do informačního systému nebo přenášena v jiné formě či jinými prostředky.

Autoři a nakladatelství nepřijímají záruku za správnost tištěných materiálů. Předkládané informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Všechny registrované nebo jiné obchodní známky použité v této knize jsou majetkem jejich vlastníků. Uvedením nejsou zpochybněna z toho vyplývající vlastnická práva.

Veškerá práva vyhrazena

© Doc. Ing. Karel Zaplatílek, Ph.D a Ing. Bohuslav Doňar, CSc., Praha 2006
Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Karel Zaplatílek, Bohuslav Doňar: MATLAB – začínáme se signály
BEN – technická literatura, Praha 2006

1. vydání

ISBN 80-7300-200-0

OBSAH

O KNIZE	9
1 ÚVOD	11
1.1 Proč jsme knihu napsali a pro koho je určena	12
1.2 Co je potřeba k práci	13
1.3 Opakování aneb co byste měli znát	14
1.3.1 Pracovní prostředí systému MATLAB	14
1.3.2 Základní způsob práce se systémem MATLAB	15
1.3.3 Použití helpů	17
1.4 Práce s literaturou	19
1.5 Licenční politika tvůrců systému MATLAB	20
2 SIGNÁLY A JEJICH MODELY	21
2.1 Pojem signál	22
2.1.1 Praktické příklady signálů	22
2.1.2 Zajímavé souvislosti, vztahující se k pojmu signál	24
2.2 Modely signálů	25
2.2.1 Skutečný, reálně existující signál	25
2.2.2 Modely signálů	27
2.3 Klasifikace signálů a jejich modelů	30
2.3.1 Signály se spojitým a diskretním průběhem veličin	30

2.3.2	Signály periodické a aperiodické	31
2.3.2.1	Periodické signály	32
2.3.2.2	Aperiodické signály	34
2.3.3	Signály deterministické a stochastické	34
2.3.3.1	Deterministické signály	35
2.3.3.2	Stochastické signály	35
2.3.4	Signály jednorozměrné a vícerozměrné	37

3 MATLAB – NÁSTROJ PRO PRÁCI S ČÍSLY 39

3.1	Číslíkové signály a jejich zobrazení	40
3.1.1	Cejchování vodorovné osy grafu	41
3.1.2	Vzorkování a diskrétní čas	43
3.1.2.1	Vzorkování	44
3.1.2.2	Diskrétní čas	47
3.2	Možnosti práce s analogovými signály	48
3.3	Shrnutí používaných termínů a symbolů	50

4 TVORBA A ZÍSKÁVÁNÍ SIGNÁLŮ V PROSTŘEDÍ MATLAB 53

4.1	Vektory a matice jako číslíková reprezentace signálů	55
4.1.1	Tvorba jednoduchých signálů a práce s nimi	55
4.1.2	Tvorba a využití vícerozměrných matic	57
4.1.3	Tvorba a využití pole buněk (Cell Arrays).....	57
4.1.4	Práce se strukturami	60
4.1.5	Práce s různými formáty čísel	61
4.2	Ukládání a načítání proměnných	62
4.2.1	Ukládání dat do souboru	62
4.2.1.1	Ukládání dat v ASCII podobě	62

4.2.1.2 Ukládání dat v binární podobě	67
4.2.2 Čtení dat ze souboru	68
4.2.2.1 Čtení dat v ASCII podobě	68
4.2.2.2 Čtení dat v binární podobě	71
4.2.3 Interaktivní podpora práce s proměnnými	74
4.2.3.1 Práce s panelem „Workspace“	75
4.2.3.2 Práce s oknem „Import Wizard“	77
4.3 Signal Processing Toolbox – základní modul pro práci se signály	79
4.4 Použití vestavěných generátorů signálů	80
4.4.1 Generování harmonických signálů	81
4.4.1.1 Práce s příkazy „sin“ a „cos“	81
4.4.1.2 Harmonický signál s proměnným kmitočtem	81
4.4.1.3 Napěťově řízený oscilátor (vco)	82
4.4.2 Generování obdélníkových signálů	84
4.4.2.1 Generování periodických obdélníkových signálů	84
4.4.2.2 Generování aperiodických obdélníkových signálů	85
4.4.3 Diskrétní jednotkový impulz a diskrétní jednotkový skok	86
4.4.4 Generování pilovitých signálů	87
4.4.4.1 Generování periodických pilovitých signálů	87
4.4.4.2 Generování aperiodických pilovitých signálů	89
4.4.5 Generování Gaussovsky modulovaného harmonického signálu	89
4.4.5.1 Generování periodických průběhů	89
4.4.5.2 Generování aperiodických průběhů	91
4.4.6 Funkce pro periodické opakování vybraných aperiodických průběhů	92
4.4.7 Generování signálů s průběhem tvaru „sinc“	94
4.4.8 Generování modulovaných signálů	95
4.4.8.1 Amplitudová modulace (AM) s potlačenou nosnou	96
4.4.8.2 Kmitočtová modulace (FM)	97
4.4.8.3 Pulzní šířková modulace (PWM)	99
4.4.8.4 Pulzní polohová modulace (PPM)	99
4.4.9 Demodulace modulovaných signálů	99
4.4.9.1 Demodulace signálu AM s přenášenou nosnou	99
4.4.9.2 Demodulace signálu FM	101

4.4.9.3 Demodulace signálu PWM	101
4.4.10 Generování náhodných signálů	102
4.4.10.1 Stručné shrnutí teorie	102
4.4.10.2 Diskrétní náhodné veličiny	103
4.4.10.3 Spojité náhodné veličiny	105
4.4.10.4 Generování signálů s rovnoměrným rozdělením hustoty pravděpodobnosti	106
4.4.10.5 Generování signálů s normálním rozdělením hustoty pravděpodobnosti	108
4.4.10.6 Výpočet střední hodnoty a směrodatné odchylky	110
4.4.10.7 Výpočet mediánu	111
4.4.11 Generování zašuměných signálů	112
4.4.11.1 Stručné shrnutí teoretických základů	112
4.4.11.2 Generování harmonického signálu, zašuměného aditivním šumem	114
4.4.12 Generování harmonického signálu s definovaným harmonickým zkreslením	115
4.4.13 Práce v interaktivním prostředí SPTOOL	117
4.4.13.1 Prohlížení signálů, jejich export a import	119
4.4.13.2 Práce s filtry	120
4.4.13.3 Spektrální analýza signálu	122
4.5 Získávání dat z externích zdrojů	122
4.5.1 Přenos dat s podporou rozhraní RS-232	123
4.5.2 Přenos dat s podporou protokolu FTP	129
4.5.3 Přenos dat pomocí systému DDE v prostředí operačního systému MS Windows®	134
4.6 Použití uživatelských funkcí jako zdroje dat	137
4.6.1 Příklady m-souborů s využitím příkazů systému MATLAB	138
4.6.2 Příklady m-souborů pro definici vlastních funkčních závislostí	141
5 ANALÝZA SIGNÁLŮ	145
5.1 Rozdělení metod analýzy	149
5.2 Analýza signálů v originální (časové) oblasti	150

5.2.1	Základní charakteristiky signálů	151
5.2.2	Globální a další charakteristiky signálů	156
5.2.2.1	<i>Mohutnost impulzu</i>	156
5.2.2.2	<i>Střední hodnota</i>	157
5.2.2.3	<i>Směrodatná odchylka</i>	159
5.2.2.4	<i>Medián</i>	160
5.2.2.5	<i>Okamžitý výkon impulzu</i>	161
5.2.2.6	<i>Činný výkon (střední výkon, výkon impulzu)</i>	162
5.2.2.7	<i>Efektivní hodnota</i>	162
5.2.2.8	<i>Energie impulzu</i>	163
5.2.2.9	<i>Vzájemná energie dvou impulzů</i>	163
5.2.2.10	<i>Derivace</i>	165
5.2.2.11	<i>Integrace</i>	166
5.2.3	Výpočet konvoluce	168
5.2.3.1	<i>Lineární diskrétní konvoluce</i>	168
5.2.3.2	<i>Kruhová (cyklická) diskrétní konvoluce</i>	173
5.2.3.3	<i>Využití algoritmu FFT pro výpočet kruhové konvoluce – rychlá konvoluce</i>	175
5.2.3.4	<i>Výpočet lineární konvoluce pomocí algoritmu FFT</i>	176
5.2.4	Korelační analýza	178
5.2.4.1	<i>Korelace a kovariance</i>	178
5.2.4.2	<i>Korelační a kovarianční funkce</i>	181
5.2.4.3	<i>Příklady užití korelačních funkcí</i>	188
5.3	Spektrální analýza	193
5.3.1	<i>Spektrální analýza analogových signálů</i>	196
5.3.1.1	<i>Spektrum harmonického signálu</i>	197
5.3.1.2	<i>Spektrum neharmonických periodických signálů</i>	204
5.3.1.3	<i>Spektrum aperiodických signálů</i>	215
5.3.2	<i>Spektrální analýza deterministických číslicových signálů</i>	225
5.3.2.1	<i>Spektrum vzorkovaného signálu, vzorkovací poučka</i>	226
5.3.2.2	<i>Fourierova transformace diskrétních signálů</i>	229
5.3.2.3	<i>Spektrální analýza periodických signálů</i>	236
5.3.2.4	<i>Spektrální analýza aperiodických signálů</i>	238
5.3.2.5	<i>Důsledky aplikace algoritmu DFT</i>	238
5.3.3	<i>Spektrální analýza stochastických číslicových signálů</i>	251
5.3.3.1	<i>Odhad výkonových spekter jednotlivých procesů</i>	254
5.3.3.2	<i>Vzájemná spektra dvojice procesů</i>	255
5.4	Časově – frekvenční analýza	258

6	ZÁVĚR	261
	LITERATURA A ODKAZY PRO DALŠÍ STUDIUM	263
	WEBOVÉ STRÁNKY TVŮRCE SYSTÉMU MATLAB	264
	PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	265
	REJSTŘÍK	266

O knize

V letech 2003 (druhé vydání 2005) a 2004 jsme v nakladatelství BEN – technická literatura Praha vydali dvě knihy o systému MATLAB. První z nich je určena pro naprosté začátečníky, druhá pro mírně pokročilé uživatele. S jejich pomocí je možné v poměrně krátké době začít s MATLABem smysluplně pracovat, vyznat se v jeho prostředí, pochopit základní filozofii a možnosti vestavěných nástrojů a dokonce začít programovat vlastní aplikace s podporou grafiky a využitím internetu. Těmito dvěma knihami se orientujeme na zejména ty čtenáře a uživatele systému MATLAB, kteří jsou začátečníky, příležitostnými uživateli nebo těmi, kteří chtějí pracovat bez často nadbytečných informací. Přitom sled kapitol, výběr obrázků a příkladů k vyzkoušení a ověření byly pečlivě voleny na základě naší dlouholeté zkušenosti tak, aby i nepřilíživě objemné publikace vedly čtenáře rychle k cíli.

Předkládaná kniha je pomyslným třetím dílem naší malé série o systému MATLAB. Jejím hlavním cílem je naučit uživatele základům práce se signály. Naší snahou je, aby čtenář – uživatel systému byl k tomuto cíli veden přímo, pouze s nezbytným množstvím názorných a pečlivě vybraných informací různého druhu. Naším přáním je, aby se kniha stala průvodcem ve světě signálů jak mírně pokročilým začátečníkům, tak uživatelům s hlubšími znalostmi a nároky.

Pracovat se signály lze v MATLABu na různých úrovních. Počínaje jednoduchou tvorbou vektorů a matic, kreslením jednoduše vytvořených dat různými typy grafů přes náročnější typy analýzy až po složité sofistikované matematické postupy a algoritmy. Je zřejmé, že každá úroveň bude vyžadovat od uživatele jinou šíři a hloubku znalostí. Použité postupy se také budou lišit podle cíle, se kterými uživatel k systému MATLAB přistupuje. Je jistě rozdíl v přístupu studenta střední školy či učiliště, který se se systémem seznamuje a zkouší si jeho možnosti či řeší jednodušší úkoly a vysokoškoláka, jenž stojí před úkolem vypracovat ročníkový projekt, bakalářskou či diplomovou práci s podporou MATLABu nebo doktoranda, učitele a vědce, pracujícího na vědeckém úkolu.

Z uvedených důvodů bylo naším nejsložitějším úkolem navrhnout vhodnou strukturu knihy tak, aby si v ní našel vše potřebné co nejširší okruh zájemců. V české republice i zahraničí existuje řada kvalitních knih a publikací, věnujících se teorii signálů. Ta je ve své podstatě poměrně široká. Mimoto, k dispozici je podobně mnoho knih o systému MATLAB. Skloubit obě oblasti, tedy teorii a aplikace, bylo také jedním z našich hlavních cílů. Není to však úkol snadný, neboť tam kde přidáte prostor jednomu, nebude se jej dostávat druhému. Na základě našich zkušeností jak s prací se systémem MATLAB, tak především s výukou zpracování signálů na vysokých školách jsme navrhli řešení, vtělené v této publikaci. Stěžejní kapitoly jsou vždy uvozeny stručným teoretickým úvodem, sestávajícím z matematického aparátu s příslušným

komentářem. Následující řada příkladů je pak vždy v souladu s touto teorií a tam, kde je to potřebné, jsou výsledky řešených příkladů ve svém závěru vždy rozebrány a komentovány pro hlubší porozumění.

Uvedený přístup ke struktuře knihy má mnoho předností. Umožňuje načerpat či zopakovat nezbytné teoretické partie a současně si je procvičit v praxi s pomocí algoritmů MATLABu. Nevýhodou je pak skutečnost, že teoretické pasáže nejsou vyčerpávající či jsou úmyslně zjednodušené. V tom případě na toto budete upozorněni, stejně jako na odkazy na dostupnou literaturu, kde lze nastudovat řadu dalších podrobností či zpřesnění.

Opět platí, že pochopí-li čtenář – uživatel princip, je vyhráno a může poté již tvořit relativně samostatně. A přesně o to nám v knize jde; s co nejmenší námahou dosáhnout co nejvíce znalostí a dovedností.

Vážení čtenáři, pokud vám nechybí chuť či motivace do práce, sešit na vlastní poznámky a v ideálním případě spuštěný počítač s legálními licencemi na systém MATLAB a jeho Signal Processing Toolbox, můžete se pustit do práce.

Děkujeme našim kolegům, studentům, čtenářům a dále všem, kteří se nám stali zdrojem inspirace a chuti do každodenní práce s MATLABem a psaní předkládané knihy.

Brno, srpen 2006

Autoři