

Spis treści

Wykaz skrótów	7
Wykaz symboli matematycznych	9
Wstęp	13
Rozdział 1. Podstawy – klasyczna teoria próbkowania i klasyczne zastosowania	15
1.1. Klasyczne próbkowanie sygnału	17
1.2. Twierdzenie o próbkowaniu (Whittakera-Kotelnikowa-Shannona-Nyquista)	21
1.3. Podpróbkowanie	22
1.4. Nadpróbkowanie	25
1.5. Odtwarzanie sygnału z próbek	28
1.5.1. Odtwarzanie sygnału dolnopasmowego	29
1.5.2. Odtwarzanie sygnału pasmowego	33
1.6. Układy próbkująco-pamiętające	33
1.7. Źródła błędów w próbkowaniu	35
1.7.1. Założenia twierdzenia o próbkowaniu a świat rzeczywisty	36
1.7.2. Próbkowanie i szum w sygnale	36
1.7.3. Niestalość chwil próbkowania (<i>jitter</i>)	39
1.7.4. Uśrednianie sygnału przez układ próbkujący	40
1.7.5. Usuwanie zakłóceń dzięki uśrednianiu sygnału	43
1.7.6. Błędy próbkowania wielokanałowego	44
Rozdział 2. Próbkowanie sygnałów okresowych i powtarzalnych	47
2.1. Próbkowanie w czasie równoważnym	47
2.1.1. Próbkowanie z wyzwalaniem okresowym (stroboskopowe)	48
2.1.2. Próbkowanie losowe z przeplotem	49
2.2. Metoda „z próbkowaniem czasu”	51
2.3. Próbkowanie bez wyzwalania (<i>triggerless</i>)	52
2.4. Uwagi implementacyjne	55
Rozdział 3. Próbkowanie nierównomierne w ujęciu tradycyjnym	57
3.1. Podstawy teoretyczne	58
3.2. Zastosowanie próbkowania nierównomiernego w radiolokacji	61
3.2.1. Podstawy działania radaru	62
3.2.2. Zawężenie modelu sygnału w celu uzyskania jednoznaczności	64

3.2.3.	Niejednoznaczność prędkości i nierównomierne próbkowanie w impulsowym radarze dopplerowskim	66
3.2.4.	Chińskie twierdzenie o resztach	68
3.2.5.	Dowód chińskiego twierdzenia o resztach	68
3.2.6.	Algorytm rozwiązywania niejednoznaczności	70
3.2.7.	Pomiar częstotliwości nierównomiernie spróbkowanego sygnału	71
3.3.	Przykład próbkowania adaptowanego do danych – próbkowanie elektrokardiogramu w chwilach przekroczenia poziomów	72
3.3.1.	Nierównomierne próbkowanie sygnału EKG	73
3.3.2.	Odtworzenie sygnału EKG próbkowanego nierównomiernie	76
Rozdział 4.	Oszczędne próbkowanie (<i>Compressed Sensing</i>)	79
4.1.	Odtwarzanie sygnału z niepełnego pomiaru	79
4.1.1.	Niejednoznaczność zagadnienia odwrotnego	81
4.1.2.	Ujednoznacznienie z zawężaniem modelu sygnału	82
4.1.3.	Model rzadki	82
4.1.4.	Historia i dzień dzisiejszy przetwarzania sygnałów o modelu rzadkim	82
4.1.5.	Uwagi terminologiczne	84
4.2.	Podstawy matematyczne	85
4.2.1.	Sygnał rzadki	86
4.2.2.	Sygnał kompresowalny	87
4.2.3.	Normy i quasi-normy ℓ_p	88
4.2.4.	Notacja macierzowa	88
4.2.5.	Proces pomiaru	90
4.2.6.	Odtworzenie sygnału	92
4.2.7.	Przykład odtwarzania sygnału metodami ℓ_2 i rzadkimi	94
4.3.	Warunki poprawnego odtworzenia sygnału	97
4.3.1.	Ograniczenia wynikające z teorii informacji	97
4.3.2.	Własność jądra $\mathbf{P}$ (<i>Null Space Property</i>)	98
4.3.3.	Własność ograniczonej izometrii (<i>Restricted Isometry Property – RIP</i>)	99
4.3.4.	Spójność	99
4.3.5.	Konstrukcje probabilistyczne	102
4.3.6.	Bayesowskie oszczędne próbkowanie	105
4.4.	Algorytmy	106
4.4.1.	Proste przeszukiwanie	107
4.4.2.	Algorytmy zachłanne	107
4.4.3.	Algorytmy optymalizacyjne	113
4.4.4.	Algorytmy z przybliżeniem quasi-normy ℓ_0 funkcjami różniczkowalnymi – SL0 i 2DSL0	115
4.4.5.	Algorytmy bayesowskiego oszczędnego próbkowania	118
4.4.6.	Metody uczenia maszynowego	120
4.4.7.	Specjalne konstrukcje macierzy pomiaru	122
4.4.8.	Wybór odpowiedniego algorytmu	123
4.4.9.	Uwagi dotyczące praktycznej realizacji algorytmów	124
Rozdział 5.	Przykłady zastosowań oszczędnego próbkowania	125

5.1. Kamera jednopikselowa	125
5.2. Rekonstrukcja obrazu w magnetycznym rezonansie jądrowym (MRI)	128
5.3. Konwerter szerokopasmowy z modulacją (MWC)	130
5.4. Radar MTI (z nierównomiernym próbkowaniem)	133
5.4.1. Oszczędne próbkowanie w radarze MTI	133
5.4.2. Spójność macierzy pomiarowej dla radarów MTI/MTD	137
5.4.3. Eksperymenty z symulowanymi sygnałami	141
5.4.4. Wnioski dotyczące odtwarzania częstotliwości Dopplera	145
5.5. Radar SAR	146
5.5.1. Synteza apertury w radarze SAR	147
5.5.2. Radar szumowy SAR	150
5.5.3. Próbkowanie przestrzenne w radarze SAR	152
5.5.4. Zastosowanie oszczędnego próbkowania w radarze SAR	153
5.5.5. Wyniki symulacji	155
5.5.6. Eksperymenty z rzeczywistym sygnałem	160
5.5.7. Omówienie wyników	162
5.5.8. Podsumowanie rekonstrukcji obrazu SAR z danych podpróbkowanych	164
5.6. Tomografia SAR	165
5.7. Badania struktury cząsteczek metodą NMR	166
5.8. Niskomocowa akwizycja sygnału EEG	168
Podsumowanie	171
Bibliografia	173