

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów 9

Od autora 13

1. Tłumienie sygnału w łączu radiowym 19

1.1. Podstawowa struktura łącza radiowego 20

1.2. Opis rodzajów tłumienia sygnału radiowego 22

1.2.1. Tłumienie całkowite LC 22

1.2.2. Tłumienie systemowe LS 22

1.2.3. Tłumienie transmisyjne LT 22

1.2.4. Tłumienie transmisyjne podstawowe LTP 23

1.2.5. Tłumienie transmisyjne dowolnej ścieżki propagacyjnej $LTR(\theta, \phi)$ 23

1.2.6. Tłumienie transmisyjne wolnej przestrzeni LTWP(d/λ) 23

1.2.7. Tłumienie transmisyjne medium propagacyjnego LTm 24

1.3. Wpływ otoczenia anteny na tłumienie transmisyjne 24

1.4. Podstawowe przeliczenia projektowe dla łącza radiowego 26

1.5. Właściwości kierunkowe podstawowych anten referencyjnych 27

1.6. Międzynarodowy podział fal elektromagnetycznych 27

1.7. Podzakresy częstotliwościowe planowane do zagospodarowania w sieciach 5G/IoT 28

Literatura 29

2. Uwarunkowania propagacyjne w radiowych sieciach lokalnych (RLAN) w środowisku otwartym 30

2.1. Charakterystyka wstępna sieci RLAN 31

2.2. Modele propagacyjne 33

2.2.1. Propagacja w mikrokomórce o zasięgu od 50 m do 1 km 34

2.2.2. Propagacja w mikrokomórce o zasięgu od 50 m do 0,5 km 38

2.2.3. Propagacja w pikokomórce o zasięgu do 50 m 40

2.3. Propagacja na obszarach podmiejskim, osiedlowym i wiejskim 41

Literatura 43

3. Uwarunkowania propagacyjne w radiowych sieciach lokalnych (RLAN) w środowisku zamkniętym 44

3.1. Charakterystyka wewnątrzbudynkowych sieci RLAN 45

3.2. Modele propagacyjne 46

3.2.1. Model podstawowy 46

3.2.2. Tłumienie sygnału radiowego przenikającego do wnętrza budynku 49

3.2.3. Tłumienie sygnału radiowego w krótkim łączu typu BAN 52

Literatura 53

4. Propagacja wielodrogowa – odpowiedź impulsowa kanału radiowego 54

4.1. Charakterystyka zjawiska wielodrogowości 54

4.1.1. Opis podstawowy – profil kanału radiowego w dziedzinie czasu 55

4.1.2. Opis kątowy zjawiska wielodrogowości 58

4.1.3. Czasowo-przestrzenne ujęcie zjawiska wielodrogowości 63

4.1.4. Czasowo-częstotliwościowe ujęcie zjawiska wielodrogowości 63

4.1.5. Uwarunkowania pojemnościowe w kanale MIMO 64

4.2. Profile czasowe i przestrzenne (kątowe) kanałów szerokopasmowych w podzakresach UHF i SHF 67

4.2.1. Profile czasowe odpowiedzi impulsowej kanału szerokopasmowego 69

4.2.2. Profile kątowe odpowiedzi impulsowej kanału szerokopasmowego w stacji stałej (bazowej) 71

4.2.3. Profile kątowe odpowiedzi impulsowej kanału szerokopasmowego w stacji ruchomej (terminalowej) 73

Literatura 74

5. Model propagacyjny WINNER II 75

5.1. Rodzaje środowisk propagacyjnych i typy łącz radiowych 75

5.2. Wielowariantowy model propagacyjny 78

5.2.1. Opis podstawowy 78

5.2.2. Opisy poszczególnych wariantów modelu 79

5.2.3. Prawdopodobieństwo występowania warunku LOS 85

Literatura 86

6. Analizowanie uwarunkowań propagacyjnych według zaleceń ETSI 87

6.1. Obliczanie tłumienia sygnału radiowego w środowisku otwartym i zamkniętym 87

6.1.1. Środowisko otwarte 87

6.1.2. Środowisko zamknięte 90

6.2. Tłumienie sygnału radiowego wnikaącego do wnętrza budynku lub samochodu 91

6.2.1. Wnikanie sygnału do wnętrza budynku 91

6.2.2. Wnikanie sygnału do wnętrza samochodu 93

6.3. Szacowanie prawdopodobieństwa występowania warunku LOS 94

Literatura 96

7. Wpływ dyfrakcji na tłumienie sygnału radiowego 97

7.1. Podstawowy opis efektywnej przestrzeni propagacyjnej 98

7.1.1. Elipsoidy Fresnela – efektywna przestrzeń propagacyjna 98

7.1.2. Strefa dyfrakcyjna i cień radiowy 100

7.1.3. Kryterium radiowej gładkości podłoża propagacyjnego 101

7.2. Pozahoryzontowe radiowe trasy propagacyjne 101

7.2.1. Tłumienie dyfrakcyjne 101

7.2.2. Tłumienie dyfrakcyjne sygnałów w warunkach LOS 104

7.3. Tłumienie dyfrakcyjne na przeszkodach terenowych 107

7.3.1. Pojedyncza krawędź ostra 107

7.3.2. Pojedyncza krawędź zaokrąglona 108

7.3.3. Dwie krawędzie ostre 110

7.3.4. Szereg krawędzi zaokrąglonych 111

7.4. Naziemna trasa radiowa 113

7.4.1. Model Bullingtona 113

7.4.2. Model uogólniony 115

Literatura 118

8. Wpływ refrakcji troposferycznej na propagację sygnału radiowego 119

8.1. Podstawowy opis zjawiska refrakcji troposferycznej 120

8.1.1. Wskaźnik refrakcji troposferycznej 120

8.1.2. Krzywoliniowa trajektoria rozchodzenia się fali radiowej w troposferze 121

8.1.3. Zastępczy promień kuli ziemskiej 122

8.2. Troposferyczna trasa radiowa 123

8.2.1. Rozproszenie wiązki radiowej na krzywoliniowej trasie propagacji 123

8.2.2. Zmienność długości trasy propagacyjnej 124

8.2.3. Radiowy dukt troposferyczny 128

Literatura 133

9. Analizowanie naziemnych tras propagacyjnych w paśmie od 30 MHz do 50 GHz 134

9.1. Mechanizmy propagacyjne na trasach naziemnych 134

9.1.1. Mechanizm podstawowy – wariant pierwszy 135

9.1.2. Anomalia propagacyjna w dukcie troposferycznym – wariant drugi 136

9.1.3. Rozproszenie w troposferze – wariant trzeci 137

9.1.4. Sporadyczne odbicia od jonosfery – wariant czwarty 139

9.2. Modelowanie mieszane – kompozycje wybranych wariantów 141

9.2.1. Propagacja nad powierzchnią ziemską z anomalią propagacyjną – kompozycja pierwsza 142

9.2.2. Model uogólniony – kompozycja druga 142

9.3. Charakterystyka korelacyjna mechanizmów propagacyjnych 143

Literatura 145

10. Uwarunkowania propagacyjne w satelitarnej telekomunikacji ruchomej 146

10.1. Wpływ przeszkód terenowych 146

10.1.1. Przydrożny drzewostan 147

10.1.2. Środowisko zabudowane 149

10.2. Wpływ zjawiska wielodrogowości 153

10.2.1. Środowisko górzyste 153

10.2.2. Wpływ drzew przydrożnych 154

10.3. Szacowanie zaników sygnału 154

10.3.1. Podstawy modelu statystycznego 155

10.3.2. Predykcja zaników w łączu satelitarnym 155

10.4. Modelowanie wnikanía sygnału satelitarnego do wnętrza budynku 157

10.5. Uogólniona charakterystyka satelitarnej trasy propagacyjnej 158

Literatura 159

11. Uwarunkowania propagacyjne w bezprzewodowych stałych łączach optycznych 160

11.1. Uwarunkowania molekularne 161

11.1.1. Absorpcja molekularna 161

11.1.2. Rozproszenie molekularne 162

11.2. Uwarunkowania transmisyjne w aerozoluach 162

11.2.1. Absorpcja w aerozoluach 162

11.2.2. Rozproszenie w aerozoluach 163

11.3. Wahania sygnału optycznego 164

11.4. Wpływ deszczu i śniegu 165

11.5. Wpływ oświetlenia słonecznego 166

11.6. Bilans energetyczny łącza optycznego 167

11.7. Klasyfikacja widoczności optycznej 168

Literatura 169

12. Modelowanie kanału radiowego w sieciach 5G o dużych przepływnościach 170

12.1. Segmentacja trasy propagacyjnej w środowisku miejskim 171

12.1.1. Model segmentowy 171

12.1.2. Uwzględnianie obszaru dyfrakcyjnego 173

12.2. Wpływ przysłonięcia trasy propagacyjnej 174

12.3. Wpływ rozpraszania sygnału radiowego 176

12.4. Łączne oddziaływanie przystłonięcia i rozproszenia 177

12.5. Wnikanie sygnału radiowego do wnętrza budynku 178

12.6. Wpływ przeszkód niestacjonarnych 179

Literatura 180

13. Uwarunkowania propagacyjne w podzakresach LF i MF 181

13.1. Wyznaczanie rozkładu pola elektrycznego w podzakresie poniżej 150 kHz 181

13.1.1. Mechanizm propagacji skokowej 182

13.1.2. Propagacja wieloskokowa 186

13.2. Wyznaczanie rozkładu pola elektrycznego w podzakresie powyżej 150 kHz 188

Literatura 191

14. Analizowanie zakłócającego oddziaływania stacji radiokomunikacyjnych 192

14.1. Mechanizmy propagacyjne radiowego pola zakłócającego w systemach naziemnych 193

14.2. Obliczanie tłumienia radiowych sygnałów zakłócających w systemach naziemnych 195

14.2.1. Podstawowe tłumienie transmisyjne 196

14.2.2. Tłumienie hydrometeoru 199

14.3. Obliczanie tłumienia radiowych sygnałów zakłócających w systemach Ziemia-satelita 201

14.3.1. Geometria trasy propagacyjnej 201

14.3.2. Podstawowe tłumienie transmisyjne sygnału zakłócającego 204

Literatura 205

15. Uwarunkowania propagacyjne przy wyznaczaniu obszaru koordynacyjnego 206

15.1. Graniczne odległości koordynacyjne 207

15.1.1. Minimalna odległość koordynacyjna 207

15.1.2. Maksymalna odległość koordynacyjna 208

15.2. Szacowanie obszaru koordynacyjnego w sieciach naziemnych 209

15.2.1. Opis ogólny 210

15.2.2. Podzakres od 100 MHz do 790 MHz 211

15.2.3. Podzakres od 790 MHz do 60 GHz 212

15.2.4. Podzakres od 60 GHz do 105 GHz 216

15.3. Obszar koordynacyjny wokół naziemnej stacji satelitarnej 218

15.3.1. Geometria zakłócającego oddziaływania hydrometeoru 218

15.3.2. Szacowanie odległości koordynacyjnej – wpływ hydrometeoru 220

15.3.3. Wpływ kierunku promieniowania anteny zakłócającej 224

15.4. Wpływ anteny na obszar koordynacyjny 226

Literatura 230

Dodatek

Rozkłady prawdopodobieństwa stosowane w modelowaniu zagadnień propagacyjnych 231

D1. Wprowadzenie 231

D2. Rozkład normalny 232

D3. Rozkład log-normalny 233

D4. Rozkład Rayleigha 233

D5. Rozkład łączny log-normalny – Rayleigha 234

D6. Rozkład łączny n-Nakagami-Rice'a 235

D7. Rozkład Gamma 236

D8. Rozkład m-Nakagami 237

D9. Rozkład χ^2 Pearsona 237

Literatura 239

Skorowidz 240