

1 イン트로ダクション

- 1.1 オペアンプの基礎用語の定義 1
 - 1.1.1 ゼロボルトはどこか? 1
 - 1.1.2 同相入力電圧と差動入力電圧 2
 - 1.1.3 出力電圧 2
- 1.2 オペアンプ回路計算の基本 3
 - 1.2.1 オペアンプの基本動作 3
 - 1.2.2 反転・非反転増幅器の伝達関数 5
- 1.3 オペアンプ回路の基礎用語の定義 7
 - 1.3.1 帰還抵抗器の R_f と R_s 7
 - 1.3.2 電圧帰還率(β) 7
 - 1.3.3 ノイズゲイン 8
- 1.4 誤差要因は加算できる 10

2 Null ループの基礎

- 2.1 Null ループとその基本動作 13
- 2.2 オペアンプの静特性 14
- 2.3 Null ループを用いた静特性の測定例 15

3 入力オフセット電圧 (Input offset voltage)

- 3.1 意味 17
- 3.2 影響を受けるアプリケーション 17
- 3.3 製品仕様上の注意点 17
- 3.4 関連する製品仕様項目 18
- 3.5 Null ループを用いた入力オフセット電圧の測定 18
- 3.6 製品仕様の活用 19
 - 3.6.1 入力オフセット電圧と出力電圧の関係 19
 - 3.6.2 反転入力端子の電圧測定 20
 - 3.6.3 入力オフセット電圧調整回路 21
 - 3.6.4 入力オフセット電圧の測定条件に注意 22
 - 3.6.5 発振による影響 22
 - 3.6.6 ユニティゲイン帯域幅を超える入力信号による影響 22
 - 3.6.7 熱起電力による影響 22

4 長期入力オフセット電圧ドリフト

- 4.1 意味 25
- 4.2 長期入力オフセット電圧ドリフトの計算方法 25
 - 4.2.1 「通電時間あたりのドリフト電圧」で表される場合 25
 - 4.2.2 「通電時間の平方根あたりのドリフト電圧」で表される場合 26
- 4.3 長期入力オフセット電圧ドリフト規定上の問題点 26

5 入力オフセット電圧・平均温度ドリフト

- 5.1 意味 29
- 5.2 高精度オペアンプの利用 29

6 オープンループ・ゲイン (Open Loop Gain)

- 6.1 意味 31
- 6.2 影響を受けるアプリケーション 32
- 6.3 製品仕様上の注意点 32
- 6.4 関連する製品仕様項目 33
- 6.5 オープンループ・ゲインの測定 33
 - 6.5.1 Null ループによる測定 33

- 6.5.2 スイープ測定での注意事項 35
- 6.6 製品仕様の活用 37
 - 6.6.1 非反転増幅器の直流シグナルゲイン 37
 - 6.6.2 反転増幅器の直流シグナルゲイン 40
 - 6.6.3 差動入力電圧の計算 43
 - 6.6.4 ループゲインと直流増幅器の精度 48
 - 6.6.5 オープンループ・ゲインの非直線性への対処 50
 - 6.6.6 負荷を軽くしてオープンループ・ゲインを稼ぐ 50
 - 6.6.7 負の A_{VO} 特性 51

7 同相入力電圧除去比 (Common Mode Rejection Ratio)

- 7.1 意味 53
- 7.2 影響を受けるアプリケーション 53
- 7.3 製品仕様上の注意点 53
- 7.4 関連する製品仕様項目 54
- 7.5 Null ループを用いた同相入力電圧除去比の測定 54
- 7.6 製品仕様の活用 56
 - 7.6.1 差動入力電圧の計算 56
 - 7.6.2 非対称電源電圧での反転・非反転増幅器の出力電圧の計算 57
 - 7.6.3 単一電源オペアンプを使った反転・非反転増幅器の出力電圧の計算 61
 - 7.6.4 CMRR の非直線性 63
 - 7.6.5 Phase Reversal 64

8 電源電圧変動除去比 (Power Supply Rejection Ratio)

- 8.1 意味 67
- 8.2 影響を受けるアプリケーション 69
- 8.3 製品仕様上の注意点 69
- 8.4 関連する製品仕様項目 69
- 8.5 Null ループを用いた電源電圧変動除去比の測定 70
- 8.6 製品仕様の活用 71
 - 8.6.1 差動入力電圧の計算 71
 - 8.6.2 CMRR の電源端子間電位差依存性と PSRR の同相入力電圧依存性 72
 - 8.6.3 PSRR を含めた出力電圧の計算 (両電源) 75
 - 8.6.4 PSRR を含めた出力電圧の計算 (単一電源) 78
 - 8.6.5 非対称な電源電圧変化に対する差動入力電圧変化 81
 - 8.6.6 PSRR の非直線性 83

9 入力バイアス電流 (Input bias current)

- 9.1 意味 85
- 9.2 影響を受けるアプリケーション 85
- 9.3 製品仕様の注意点 86
 - 9.3.1 平均値で規定される入力バイアス電流 86
 - 9.3.2 JFET 入力オペアンプの大きな温度依存性 86
- 9.4 関連する製品仕様項目 87
- 9.5 入力バイアス電流の測定 88
 - 9.5.1 Null ループを用いた入力バイアス電流測定 88
 - 9.5.2 微小入力バイアス電流測定に必要な配慮 91
 - 9.5.3 雑音の低減 その1 93
 - 9.5.4 雑音の低減 その2 93

9.6 製品仕様の活用 95

- 9.6.1 電流源にみなせる入力バイアス電流 95
- 9.6.2 反転入力バイアス電流が与える影響 95
- 9.6.3 入力バイアス電流補償抵抗器 97
- 9.6.4 分圧器と非反転入力端子の入力バイアス電流 100
- 9.6.5 JFET 入力オペアンプの入力バイアス電流の温度依存性と対策 103
- 9.6.6 入力バイアス電流の同相入力電圧依存性 103
- 9.6.7 入力バイアス電流の差動入力電圧依存性 104

10 入力オフセット電流 (Input offset current)

- 10.1 意味 105
- 10.2 影響を受けるアプリケーション 105
- 10.3 製品仕様上の注意点 106
 - 10.3.1 入力バイアス電流の最大値との関係 106
 - 10.3.2 JFET 入力オペアンプの大きな温度依存性 106
 - 10.3.3 入力端子間電位差依存性 106
- 10.4 関連する製品仕様項目 106
- 10.5 入力オフセット電流の測定 107

11 入力抵抗 (Input Resistance)

- 11.1 意味 109
- 11.2 影響を受けるアプリケーション 110
- 11.3 製品仕様の注意点 110
 - 11.3.1 JFET 入力オペアンプの温度依存性 110
 - 11.3.2 差動入力電圧変化の非直線性 110
- 11.4 関連する製品仕様項目 111
- 11.5 入力抵抗の測定 111
 - 11.5.1 入力抵抗の算出方法 111
 - 11.5.2 入力抵抗の測定 114
 - 11.5.3 負の差動入力抵抗を持つオペアンプ 115
- 11.6 製品仕様の活用 116
 - 11.6.1 抵抗器のように振舞う入力抵抗 116
 - 11.6.2 非反転増幅器の入力抵抗 118
 - 11.6.3 入力抵抗の帰還抵抗への影響 122
 - 11.6.4 入力抵抗の交流特性 123
 - 11.6.5 入力端子間の電圧-電流特性 126

12 Null ループの製作

- 12.1 Null ループが使われる理由 127
- 12.2 製作する Null ループの概要 129
 - 12.2.1 Null ループ回路 135
 - 12.2.2 電圧源回路 135
 - 12.2.3 電源回路 136
 - 12.2.4 RAMP 電圧発生回路 136
 - 12.2.5 方形波発生回路 137
 - 12.2.6 DUT 周辺回路 137
- 12.3 Null ループの製作 139
 - 12.3.1 使用する部品 139
 - 12.3.2 Null アンプに用いるオペアンプの選定 140
 - 12.3.3 Null ループ安定性の確認方法と予備実験 141
 - 12.3.4 基板の製作 143
 - 12.3.5 実装上の注意点 145
- 12.4 回路の調整 146
- 12.5 製作した Null ループでの測定 147

- 12.5.1 測定前の準備 147
- 12.5.2 Null ループの安定性確認 148
- 12.5.3 入力オフセット電圧(V_{OS})の測定 149
- 12.5.4 同相入力電圧除去比(CMRR)の測定 150
- 12.5.5 同相入力電圧除去比(CMRR)のスweep測定 150
- 12.5.6 スweep波形の平滑 151
- 12.5.7 電源電圧変動除去比(PSRR)の測定 153
- 12.5.8 電源電圧変動除去比(PSRR)のスweep測定 153
- 12.5.9 オープンループ・ゲイン(A_{VO})の測定 155
- 12.5.10 オープンループ・ゲイン(A_{VO})のスweep測定 155
- 12.5.11 入力バイアス電流(I_{IB})・入力オフセット電流(I_{IO})の測定 157

13 電源電流 (Supply Current)

- 13.1 意味 159
- 13.2 電源電流の測定 159
- 13.3 製品仕様の活用 160
 - 13.3.1 電源デカップリング・コンデンサ 160

14 No AC Feedback 回路の基礎

- 14.1 No AC Feedback 回路 163
 - 14.1.1 No AC Feedback 回路の概念 163

15 スルーレート (Slew Rate)

- 15.1 意味 165
- 15.2 影響を受けるアプリケーション 165
- 15.3 製品仕様上の注意点 165
- 15.4 関連する製品仕様項目 166
- 15.5 スルーレート測定 167
 - 15.5.1 スルーレート測定 167
 - 15.5.2 方形波信号源への要求 168
 - 15.5.3 オシロスコープへの要求 169
 - 15.5.4 DUT の負荷 170
 - 15.5.5 電流制限が必要なオペアンプ 171
 - 15.5.6 測定結果に含まれる非線形部分の扱い 172
- 15.6 製品仕様の活用 173
 - 15.6.1 正弦波の最大変化率と振幅・周波数の関係 173
 - 15.6.2 周波数帯域幅は出力振幅に依存する 174
 - 15.6.3 スルーレートは差動入力電圧に比例する 175
 - 15.6.4 単位差動入力電圧あたりのスルーレート 177
 - 15.6.5 SR_v の検証 178
 - 15.6.6 差動入力電圧 vs. スルーレートの測定方法 178
 - 15.6.7 差動入力電圧 vs. スルーレートが直線特性になるメカニズム 180
 - 15.6.8 SR_v 起因での誤差 181
 - 15.6.9 小振幅方形波に対する反転・非反転増幅器の応答 183

16 GB 積 (Gain Band Width Product)

- 16.1 意味 187
- 16.2 影響を受けるアプリケーション 188
- 16.3 製品仕様上の注意点 189
 - 16.3.1 ユニティゲインとの混同 189
 - 16.3.2 周波数帯域幅は出力振幅に依存する 189

- 16.3.3 減衰特性は常に-6[dB/octave]ではない 189
- 16.4 関連する製品仕様項目 189
- 16.5 GB 積の測定 191
- 16.6 製品仕様の活用 193
 - 16.6.1 交流でのオペアンプ回路の基本動作 193
 - 16.6.2 非反転増幅器の交流伝達諸特性の計算 196
 - 16.6.3 反転増幅器の交流伝達諸特性の計算 205
 - 16.6.4 実測による検証 209
 - 16.6.5 シグナルゲインと位相の周波数特性 212
 - 16.6.6 静電容量を含む帰還回路のシグナルゲイン 215
 - 16.6.7 実測による検証 221
 - 16.6.8 シグナルゲインと入力抵抗・出力抵抗 226
 - 16.6.9 負の A_{VO} 特性の交流での振舞いと影響 226

17 ユニティゲイン帯域幅 (Unity Gain Band Width)

- 17.1 意味 231
- 17.2 アプリケーションへの影響 231
- 17.3 製品仕様上の注意点 232
- 17.4 ユニティゲイン帯域幅の測定 233
- 17.5 製品仕様の活用 235
 - 17.5.1 高域周波数のシグナルゲインの計算方法 235
 - 17.5.2 高域のシグナルゲインに影響を与える位相特性 237

18 出力抵抗 (Output Resistance)

- 18.1 意味 239
 - 18.1.1 AC 出力抵抗 240
 - 18.1.2 DC 出力抵抗 241
- 18.2 関連する製品仕様項目 242
- 18.3 出力抵抗の測定 243
 - 18.3.1 AC 出力抵抗の測定 243
 - 18.3.2 DC 出力抵抗の測定 246
 - 18.3.3 DC 出力抵抗の問題点 247
 - 18.3.4 相互コンダクタンス(gm)の利用と測定 249
 - 18.3.5 オープンループ・ゲインを利用した DC 出力抵抗 253
- 18.4 製品仕様の活用 254
 - 18.4.1 直流クローズド・ループ出力抵抗 254
 - 18.4.2 クローズド・ループ出力インピーダンス 257
 - 18.4.3 実測による検証 261
 - 18.4.4 高域周波数で制限を受ける出力端子電流 265
 - 18.4.5 クローズド・ループ出力インピーダンスの周波数特性 267
 - 18.4.6 出力電圧振幅・遅延時間の負荷抵抗依存性 269
 - 18.4.7 低インピーダンス負荷駆動への対策 273
 - 18.4.8 静電容量負荷 276
 - 18.4.9 静電容量負荷の計算 279
 - 18.4.10 出力抵抗値の入手方法 283

19 VCCS (Voltage Controlled Current Source) の製作

- 19.1 VCCS とその用途 285
- 19.2 製作する VCCS の概要 285
- 19.3 VCCS の回路図とその主要回路の動作 287
- 19.4 コンプライアンス電圧発生回路 290
- 19.5 その他の回路 290
- 19.6 VCCS の製作上の注意点 291

- 19.7 VCCS の調整手順 291
- 19.8 VCCS の広帯域化 292

20 No AC Feedback 回路の製作

- 20.1 No AC Feedback 回路の全体像の把握 293
- 20.2 No AC Feedback 回路の安定性評価 295
- 20.3 No AC Feedback 回路の理論 296
 - 20.3.1 帰還回路の伝達特性 297
 - 20.3.2 DUT(オペアンプ)のオープンループ伝達特性 300
 - 20.3.3 No AC Feedback 回路の伝達特性(振幅) 302
 - 20.3.4 No AC Feedback 回路の伝達特性(位相) 304
- 20.4 雑音の低減 307
- 20.5 交流入力バイアス電流測定とその問題点 307

21 等価入力雑音電圧 (Equivalent Input Noise Voltage)

- 21.1 意味 311
 - 21.1.1 白色雑音 311
 - 21.1.2 1/f 雑音 312
- 21.2 影響を受けるアプリケーション 313
- 21.3 製品仕様上の注意点 313
- 21.4 関連する製品仕様項目 313
- 21.5 等価入力雑音電圧の測定 314
 - 21.5.1 電圧増幅度と等価雑音帯域幅の平方根の積 314
 - 21.5.2 白色雑音の測定 316
 - 21.5.3 1/f 雑音の測定 321
 - 21.5.4 雑音測定の測定環境 328
- 21.6 製品仕様の活用 329
 - 21.6.1 雑音電圧の加算 329
 - 21.6.2 抵抗器の熱雑音 330
 - 21.6.3 並列コンデンサによる抵抗器の熱雑音の低減 332
 - 21.6.4 広帯域出力雑音電圧とノイズゲインの関係 336
 - 21.6.5 帰還コンデンサ C_f を持つ増幅器の出力雑音電圧 339
 - 21.6.6 帰還コンデンサ C_f を持たない増幅器の出力雑音電圧 343
 - 21.6.7 出力雑音の検証 345
 - 21.6.8 C_f の算出方法 349
 - 21.6.9 C_f 算出方法の検証 355
 - 21.6.10 任意のしきい値を超える雑音の発生確率 358

22 等価入力雑音電流 (Equivalent Input Noise Current)

- 22.1 意味 365
- 22.2 影響を受けるアプリケーション 365
- 22.3 製品仕様上の注意点 366
- 22.4 関連する製品仕様項目 366
- 22.5 等価入力雑音電流の測定 367
 - 22.5.1 等価入力雑音電流測定の原理と手順 367
 - 22.5.2 等価入力雑音電流の実測例 371
 - 22.5.3 測定上の注意点 373
- 22.6 製品仕様の活用 375
 - 22.6.1 ショット雑音 375
 - 22.6.2 雑音電流の加算 376
 - 22.6.3 抵抗器の熱雑音電流 376

23 雑音測定器の設計・製作

- 23.1 全体の構成 379
- 23.2 低雑音プリアンプの設計・製作 388
 - 23.2.1 初段増幅器の設計 388
 - 23.2.2 初段入力回路の設計 391
 - 23.2.3 2〜3段の設計 393
 - 23.2.4 2次CR結合HPFの等価雑音帯域幅の計算 394
 - 23.2.5 2次CR結合HPFの等価雑音帯域幅の計算方法(積分) 394
 - 23.2.6 2次CR結合HPFの等価雑音帯域幅の計算方法(表計算ソフト) 397
 - 23.2.7 低雑音プリアンプの調整 400
- 23.3 1kHz BPFの設計・製作 401
 - 23.3.1 1kHz BPF設計のアウトライン 401
 - 23.3.2 1kHz BPFの簡易設計 402
 - 23.3.3 1kHz BPFの伝達関数 406
 - 23.3.4 1kHz BPFの等価雑音帯域幅 411
 - 23.3.5 1kHz BPFの電圧増幅度 413
 - 23.3.6 1kHz BPFの部品選定 414
 - 23.3.7 1kHz BPFの測定と調整 416
- 23.4 10Hz LPFの設計・製作 420
 - 23.4.1 10Hz LPF設計のアウトライン 420
 - 23.4.2 10Hz LPFの伝達関数 421
 - 23.4.3 10Hz LPFの等価雑音帯域幅 426
 - 23.4.4 10Hz LPFの設計 428
 - 23.4.5 10Hz LPFの部品選定 429
 - 23.4.6 10Hz LPFの調整 430
- 23.5 出力セレクター 435
- 23.6 電源 436
- 23.7 DUT周辺 437
- 23.8 1/1000分圧器 438

24 絶対最大定格 (Absolute Maximum Rating)

- 24.1 意味 441
- 24.2 電氣的オーバーストレス(EOS) 442
 - 24.2.1 EOSと対策 事例1 442
 - 24.2.2 EOSと対策 事例2 446

25 V-Iトレーサーの製作

- 25.1 V-Iトレーサーとは 449
- 25.2 V-Iトレーサーの仕様 449
- 25.3 回路図とその説明 449
- 25.4 V-Iトレーサーの調整 452
- 25.5 使用方法 452

26 クイック・デザインマニュアル

- 26.1 反転・非反転増幅器の直流領域の設計 455
 - 26.1.1 出力電圧の計算 455
 - 26.1.2 低抵抗負荷の駆動 456
 - 26.1.3 非反転増幅器の入力抵抗 456
 - 26.1.4 直流シグナルゲインの計算 457
 - 26.1.5 出力電流変化に伴う出力電圧変化 457
 - 26.1.6 製品仕様項目の非線形と問題点 458
 - 26.1.7 アプリケーション回路上で発生する誤差要因 458

- 26.2 反転・非反転増幅器の交流領域の設計 460
 - 26.2.1 交流シグナルゲインと位相の計算 460
 - 26.2.2 低インピーダンス負荷の駆動 461
 - 26.2.3 出力電流に対する出力リップル電圧の振幅と位相 462
 - 26.2.4 静電容量負荷 462
 - 26.2.6 方形波の増幅 462
 - 26.2.7 ヒステリシス特性 463
- 26.3 反転・非反転増幅器の雑音 464
 - 26.3.1 白色雑音の実効値の計算 464
 - 26.3.2 抵抗器が発生する雑音の実効値 464
 - 26.3.3 帰還コンデンサ C_f の計算 465
 - 26.3.4 任意のしきい値を超える雑音の発生確率 465
 - 26.3.5 半導体を通じる電流が発生する雑音(ショット雑音) 466
 - 26.3.6 等価雑音帯域幅の実現 466