

第 A 章

付録

A.1 複素伝達関数のための振幅自乗関数

よく知られている実関数のための振幅自乗関数はそのままでは複素伝達関数に適用することができない。従って複素伝達関数のための振幅自乗関数を新たに考えておく必要がある。複素伝達関数 $H(s) = H_R(s) + jH_I(s)$ の振幅自乗関数について考える。 j は虚数単位であり、 $H_R(s)$ 、 $H_I(s)$ は s に関する実関数である。 $H_R(s)$ 、 $H_I(s)$ を以下のように偶関数部と奇関数部に分ける。

$$\left. \begin{aligned} H_R(s) &= H_{RE}(s^2) + sH_{RO}(s^2) \\ H_I(s) &= H_{IE}(s^2) + sH_{IO}(s^2) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.1})$$

ここで、 $H_{RE}(s^2)$ 、 $H_{RO}(s^2)$ 、 $H_{IE}(s^2)$ 、 $H_{IO}(s^2)$ は s に関する偶関数である。 $H(s)$ はこれらを用いて、以下のようにあらわされる。

$$H(s) = H_{RE}(s^2) + sH_{RO}(s^2) + j(H_{IE}(s^2) + sH_{IO}(s^2)) \quad (\text{A.2})$$

$s = j\omega$ であることを考慮すれば、

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= H_{RE}(-\omega^2) + j\omega H_{RO}(-\omega^2) + j(H_{IE}(-\omega^2) + j\omega H_{IO}(-\omega^2)) \\ &= H_{RE}(-\omega^2) - \omega H_{IO}(-\omega^2) + j(H_{IE}(-\omega^2) + \omega H_{RO}(-\omega^2)) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

となる。従って、振幅自乗関数 $|H(j\omega)|^2$ は、

$$\begin{aligned} |H(j\omega)|^2 &= (H_{RE}(-\omega^2) - \omega H_{IO}(-\omega^2))^2 + (H_{IE}(-\omega^2) + \omega H_{RO}(-\omega^2))^2 \\ &= H(j\omega)H^*(-j\omega) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

となる。ここで $H^*(s)$ の形式で示される関数は、複素関数 $H(s)$ の複素共役、すなわち $H^*(s) = H_R(s) - jH_I(s)$ を示すことに注意を要する。 $H(s)$ が実伝達関数である場合は $H_I(s) = 0$ となる

ため、式 (A.4) で定義される振幅自乗関数はよく知られた実伝達関数のためのそれを含むより一般的な表現であると考えることができる。

A.2 被測定フィルタの周波数応答

複素伝達関数 $H(s) = H_R(s) + jH_I(s)$ を持つ回路の周波数特性の測定において、 $H_R(j\omega)$ 、 $H_I(j\omega)$ が個別に計測された場合、それらを用いて正及び負の周波数領域の応答を求める方法について述べる。

A.2.1 正の周波数領域における応答

$H_R(j\omega)$ 、 $H_I(j\omega)$ が計測によりすでに調べられていることを考慮すれば、正の周波数領域における周波数応答は、次式により求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &= |H_R(j\omega) + jH_I(j\omega)| \\ \angle H(j\omega) &= \angle(H_R(j\omega) + jH_I(j\omega)) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.5})$$

A.2.2 負の周波数領域における応答

負の周波数領域における周波数応答を調べるためには、 $\omega > 0$ として、 $H(-j\omega)$ を求めればよい。 $H(-j\omega)$ をその偶関数部と奇関数部に分割した形式を用いて求めると、

$$\begin{aligned} H(-j\omega) &= H_R(-j\omega) + jH_I(-j\omega) \\ &= H_{RE}(-\omega^2) - j\omega H_{RO} + j(H_{IE}(-\omega^2) - j\omega H_{IO}(-\omega^2)) \\ &= H_{RE}(-\omega^2) + \omega H_{IO}(-\omega^2) + j(H_{IE}(-\omega^2) - \omega H_{RO}(-\omega^2)) \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

となる。しかしながら、 $H_R(-j\omega)$ 、 $H_I(-j\omega)$ は測定により得られていない量であるため、このままでは負の周波数領域の周波数応答を知ることができない。そこで、実測可能な $H^*(s)$ の周波数応答について考える。

$$\begin{aligned} H^*(j\omega) &= H_R(j\omega) - jH_I(j\omega) \\ &= H_{RE}(-\omega^2) + j\omega H_{RO} - j(H_{IE}(-\omega^2) + j\omega H_{IO}(-\omega^2)) \\ &= H_{RE}(-\omega^2) + \omega H_{IO}(-\omega^2) - j(H_{IE}(-\omega^2) - \omega H_{RO}(-\omega^2)) \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

式 (A.6) と式 (A.7) は、虚部の符号だけ異なることがわかる。従って、負の周波数領域における周波数応答は、式 (A.7) を用いて以下のように求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} |H(-j\omega)| &= |H_R(j\omega) - jH_I(j\omega)| \\ \angle H(-j\omega) &= -\angle(H_R(j\omega) - jH_I(j\omega)) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.8})$$

式 (A.5)、(A.8) で示される周波数応答の計算は、 $H_R(j\omega)$ と $H_I(j\omega)$ を個別に求める提案手法だけでなく、位相差分波器や直角位相発振器を用いた従来の測定法にも適用することができる。簡単のため、入力信号に位相誤差がないと仮定する。 $\theta = 0$ を式 (6.4) に代入すれば、実部出力端子において計測される周波数応答として、 $T_1(j\omega) + jT_2(j\omega)$ が直接得られる。従って、このときの周波数応答は、式 (A.5) をそのまま適用することにより得られることがわかる。また負の周波数応答の計測は虚部の入力信号の位相を反転させることにより実現される。つまり $\theta = 180^\circ$ を式 (6.4) に代入すれば、計測される周波数応答として、 $T_1(j\omega) - jT_2(j\omega)$ が直接得られる。このときの周波数応答は、式 (A.8) から求めることができる。虚部出力端子の応答も同様にして求めることができる。

参考文献

- [1] J. G. Linvill, "RC active filter," *Proc. IRE*, March 1954.
- [2] R. P. Sallen & E. L. Key, "A practical method of designing RC active filters," *IRE Trans. Circuit Theory*, CT-2, No.1, pp.77-85, May 1955.
- [3] L. T. Bruton, "Network transfer functions using the concept of frequency-dependent negative resistance," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. CT-16, pp.406-408, Aug. 1969.
- [4] A. Antoniou, "Realization of gyrators using operational amplifiers and their use in RC-active-network synthesis," *Proc. IEEE*, vol. 166, no.11, pp.1838-1850, Nov. 1969.
- [5] F. E. Garling and E. F. Good, "The leapfrog or active-ladder synthesis," *Wireless World*, vol. 76, pp.341-345, July 1970.
- [6] L. C. Thomas, "The biquad, Part 1-Some practical-design considerations," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. CT-18, no.3, pp.350-357, May 1971.
- [7] 石橋幸男, 中東秀人, "一様損失 LC フィルタをシミュレートする能動 RC フィルタの一構成法," *信学論 (A)*, vol.J71-A, no.8, pp.1552-1562, Aug. 1988.
- [8] 石橋幸男, 続和久, 庄野和宏, "LR 両終端形 LC フィルタの構成とその能動回路 (GIC) によるシミュレーション," *電学論 (C)*, Vol.116-C, no.4, pp.465-471, April 1996.
- [9] 庄野和宏, 石橋幸男, "最少キャパシタ構成 LR 両終端奇数次 LC フィルタの構成法とその FDNR によるシミュレーション" *信学論 (A)*, Vol.J80-A, no.1, pp.272-276, Jan 1997.
- [10] 石橋幸男, 続和久, 庄野和宏, "損失を有する LC フィルタの少数の能動素子によるシミュレーション," *信学論 (A)*, Vol.J80-A, no.5, pp.785-790, May 1997.

- [11] 武部幹、"デジタルフィルタの設計," 東海大学出版会, pp.75-76, 1986.
- [12] J. Crols and M. Steyaert, "An analog integrated polyphase filter for a high performance low-IF receiver," 1995 Symp. VLSI Circuit Digest of Tech. Papers, pp.87-88, 1995.
- [13] CQ出版社,"トランジスタ技術SPECIAL No.47 特集 高周波システム&回路設計," pp.56-60
- [14] 武藤浩二,"複素信号処理を用いたSSB変復調の一手法," 電子情報通信学会信越支部大会, pp.9-10, 1993.
- [15] D. S. Humpherys, "The analysis, design and synthesis of electrical filters," Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, N. J., pp. 570-593, 1970.
- [16] G. R. Lang and P. O. Brackett, "Complex analogue filters," Proc. European Conf. Circuit Theory Design (The Hague, Netherlands), pp.412-419, Aug. 1981.
- [17] W. M. Snelgrove and A. S. Sedra, "State-space synthesis of complex analog filters," Proc. European Conf. Circuit Theory Design (The Hauge, Netherlands), pp.420-424, Aug. 1981.
- [18] P. A. Regalia, S. K. Mitra, "Low-sensitivity active filter realization using a complex all-pass filter," IEEE Trans. Circuits Syst., vol.CAS-34, no.4, pp.390-399, April 1987.
- [19] T. H. Crystal, L. Ehrman, "The design and applications of digital filters with complex coefficients," IEEE Trans. On Audio and Electroacoustics, vol. AU-16, no. 3, pp.315-320, Sep. 1968.
- [20] 武藤浩二, 神林紀嘉, "複素係数フィルタを用いた実フィルタ構成の一手法," vol. J75-A, no.7, pp.1181-1188, July 1992.
- [21] C. Muto and N. Kambayashi, "A leapfrog synthesis of complex analog filters," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E-76-A, no.2, pp.210-215, Feb. 1993.
- [22] 続和久, 石橋幸男, 庄野和宏, "複素フィルタをもとにした実係数フィルタの一構成法," 信学論 (A), Vol.J79-A, no.4, pp.910-916, April 1996.

- [23] 武藤浩二, 神林紀嘉, "周波数変換に基づく複素伝達関数の一構成法," 信学論 (A), vol.J75-A, no.11, pp.1773-1775, Nov.1992.
- [24] 武藤浩二, 神林紀嘉, "任意の遷移帯域幅を有する BPF の複素リーブフログ構成," 電気学会電子回路研究会資料, ECT-93-7, pp.61-70, Jan 1993.
- [25] 強瀬敬司, 品田雄治, "双一次複素伝達関数の回路実現とその応用," 信学論 (A), vol. J77-A, no.8, pp.1186-1188, April 1994.
- [26] C. Muto, "A new extended frequency transformation for complex analog filter design," Proc. of ITC-CSCC'99 (Sado Island), pp.800-803, July 1999.
- [27] C. Muto, "A new extended frequency transformation for complex analog filter design," Trans. IEICE, vol. E83-A, no. 6, pp.934-940, June 2000.
- [28] 武藤浩二, 神林紀嘉, "虚数抵抗の実現とそのアナログ信号処理への応用," 信学技報, CAS92-75, ICD92-113 ,pp.75-82, Nov. 1992.
- [29] J. O. Voorman, "Continuous-time analog integrated filters," in *Integrated Continuous-Time Filters - Principles, Design, and Applications*, eds. Y. P. Tsividis and J. O. Voorman, pp.15-46, IEEE Press, 1993.
- [30] 相田和俊, 庄野和宏, 石橋幸男, "マルチテールセル技術に基づくトランスコンダクタの一構成法," 信学論 (C), Vol.J82-CII, no.12, pp.662-671, Dec. 1999.
- [31] 渡部和, "伝送回路網の理論と設計", オーム社, pp.347-352, 1968.
- [32] 庄野和宏, 石橋幸男, "発振周波数範囲の広い電圧制御発振器," 信学論 (C), Vol.J82-CII no.4, pp.232-234, April 1999.
- [33] Kazuhiro SHOUNO, Yukio ISHIBASHI, "A note on synthesis of a complex coefficient BPF based on a real coefficient BPF", Proc. of ITC-CSCC 2000, Vol.2, pp.571-574, July 11-13, 2000. (Pusan Korea)
- [34] D. A. Calahan, "Computer-aided network design revised edition," pp.106-138, McGraw-Hill, USA, 1972.

- [35] H. J. Orchard, "Inductorless filters", *Electron. Lett.*, no.2, pp.224 , June 1966.
- [36] 武藤浩二, 神林紀嘉,"虚数抵抗を含む無損失複素 2 ポート回路網の素子感度に関する一検討,"
信学技報, CAS93-86, pp.91-97, Nov. 1993.
- [37] M.E. Van Valkenburg, "Network analysis second edition," pp.77-80, Prentice-Hall,
Maruzen, Tokyo Japan, 1965.
- [38] 大西克郎、西哲生、"大学課程 電気回路 (1) 第 3 版," オーム社, 1999.
- [39] M. E. Valkenburg 著, 柳沢健, 金井元他訳,"アナログフィルタの設計," 秋葉出版, pp.483-504,
1985.
- [40] Kazuhiro SHOUNO, Yukio ISHIBASHI,"Synthesis of a complex coefficient filter using pas-
sive elements and its simulation using operational amplifiers," *Proc. of ITC-CSCC'99*, Vol.1,
pp.490-493, July 13-15,1999. (Sado Island)
- [41] Kazuhiro SHOUNO, Yukio ISHIBASHI,"Synthesis of a complex coefficient filter by pas-
sive elements including ideal transformers and its simulation using operational amplifiers",
IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E83-A, no.6, pp.949-955, June 2000.
- [42] TDK フェライト事業部,"TDK フェライトコア DATA BOOK II 通信機用フェライトコ
ア,"TDK 株式会社,BLJ-004E,1999.
- [43] YHP, "Operation and service manual model 4192A LF impedance analyzer,"YHP, pp.1-4-
1-15, 1981.
- [44] 山村英穂,"トロイダルコア活用百科,"CQ 出版社, pp.8-68, 1983.

本研究に関する公表論文

- [1] 石橋幸男、続和久、庄野和宏 ” LR 両終端形 LC フィルタの構成とその能動回路 (GIC) によるシミュレーション ” 電気学会論文誌 Vol.116-C, No.4, pp.465-471, April 1996.
- [2] 続和久、石橋幸男、庄野和宏 ” 複素フィルタをもとにした実係数フィルタの一構成法 ” 電子情報通信学会論文誌 (A) Vol.J79-A, No.4, pp.910-916, April 1996.
- [3] 石橋幸男、続和久、庄野和宏 ” 損失を有する LC フィルタの少数の能動素子によるシミュレーション ” 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J80-A, No.5, pp.785-790, May 1997.
- [4] 相田和俊、庄野和宏、石橋幸男 ” マルチテールセル技術に基づくトランスコンダクタの一構成法 ” 電子情報通信学会論文誌 (C), Vol.J82-CII, No.12, pp.662-671, Dec. 1999.
- [5] Kazuhiro SHOONO, Yukio ISHIBASHI, ” Synthesis of a Complex Coefficient Filter by Passive Elements Including Ideal Transformers and Its Simulation Using Operational Amplifiers ”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E83-A, No.6, pp.949-955, June 2000.
- [6] 庄野和宏、石橋幸男 ” 周波数変換に基づく複素伝達関数の構成とその受動実現 ” 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J83-A, No.9, pp.1047-1054, Sep. 2000.
- [7] 庄野和宏、石橋幸男 ” 最少キャパシタ構成 LR 両終端奇数次 LC フィルタの構成法とその FDNR によるシミュレーション ” 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J80-A, No.1, pp.272-276, Jan. 1997.
- [8] 庄野和宏、石橋幸男 ” 発振周波数範囲の広い電圧制御発振器 ” 電子情報通信学会論文誌 (C), Vol.J82-CII No.4, pp.232-234, April 1999.

本研究に関する口頭発表

[1]Kazuhiro SHOONO, Yukio ISHIBASHI,"Synthesis of a Complex Coefficient Filter Using Passive Elements and Its Simulation Using Operational Amplifiers," Proceedings of The 1999 International Technical Conference on Circuits / Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC'99), Vol.1, pp.490-493, July 13-15,1999. (Sado Island)

[2]Kazuhiro SHOONO, Yukio ISHIBASHI,"A Note on Synthesis of a Complex Coefficient BPF Based on a Real Coefficient BPF", Proceedings of The 2000 International Technical Conference on Circuits / Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2000), Vol.2, pp.571-574, July 11-13, 2000. (Pusan, Korea)

本研究に関する公表予定論文

[1] 庄野和宏、石橋幸男 "複素係数フィルタの周波数特性の測定法に関する一考察" 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J83-A, No.12, pp.1486-1494, Dec. 2000 (2000年12月掲載予定)