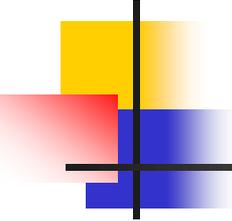


2021年6月28日(月)



計測制御工学 第11回講義

制御工学・信号処理と電子回路

小林春夫

群馬大学大学院理工学府 電子情報部門

koba@gunma-u.ac.jp

下記から講義使用 pdfファイルをダウンロードしてください。

出席・講義感想もここから入力してください。

<https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/lecture/lecture.html>

中国 福建省 厦門(あもい)市



2017年12月6日

信号処理と通信システム国際会議(IEEE ISPACS 2017) 紀行

海上の花壇の都市 厦門市 (中国福建省) にて2017年11月6-9日開催
IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems
(ISPACS), Xiamen, China (Nov. 6-9, 2017).

群馬大学大学院 理工学府
電子情報部門 小林春夫

中国 厦門市での11月上旬にての信号処理関係の国際会議 ISPACS2017 に
研究室で参加し, 多数の論文発表, 情報収集を行った。

学会 HP <http://ispacs2017.hqu.edu.cn/>



厦門(アモイ)市に訪れるのは2回目である。

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/warehouse/2013amoi-HP8.pdf>

厦門市に6つの地下鉄建設中, 1つは間もなく完成。人口は実質500万人

● 信号処理関係の国際会議は落ち着いた雰囲気

参加しているLSIテスト, 回路とシステム, 集積回路設計, 半導体デバイス, 信号処理, 電源回路関係等のそれぞれの国際会議 (所属している研究者) では雰囲気が異なると感じる。各国際会議には会社の雰囲気の「社風」ようなものがある。今回参加したISPACS は落ち着いた雰囲気である。

● 国際会議は美しい場所・最も良い気候の時期に開催されることが多い。

「美しい自然に囲まれていたり, 素晴らしい寺院がたくさんあったりと, 美しいものに囲まれている場所にたくさんの天才が生まれている。自然, 音楽, 芸術など美しいものを, 自分のそばに置いておくことがいかに大切か, ということです。」 (数学者 藤原正彦先生)

● 国際学会は知識の宝庫

「21世紀の基本的な経営資源(生産手段)は, 資本でも天然資源(土地)でも労働でもない。それは知識となる。これからの鍵は知識である。世界は労働集約的でも原材料集約的でもエネルギー集約的でもなくなる。」 (経営学者 ピーター・ドラッカー)

● 群馬大学から15名の参加 ナポレオンの故事「戦力・兵力の集中」

1. MANIMEL WADU Sahan Dulara (サハン) 修士1年
2. 王 建龍 博士3年
3. 熊 軼 修士2年
4. 孫 逸菲 博士1年
5. 姚 丹 修士1年
6. 高橋 莉乃 修士1年
7. 三木 夏子 修士1年
8. 新井 宏崇 修士1年
9. 井田 貴士 修士1年
10. 小澤 祐喜 修士1年
11. 櫻井 翔太郎 修士1年
12. 石井 司 修士1年
13. 福田 雅史 修士1年
14. 小堀 康功 客員教授
15. 小林 春夫 教授

修士1年で海外の国際会議で発表すると就職活動にもポジティブに働く。

● 研究室OBとの合流

- 東京都市大学 傘昊先生(群馬大学 小林研究室OB)グループも参加された。
- 林海軍先生(群馬大学 小林研究室OB, 厦門理工学院 准教授)には学会開催の地元ということで, スリランカ学生の中国ビザ取得および現地では大変お世話になった。



会場のホテル

- **ISPACS2017 の論文採択率51%** **敗戦は師なり**

プログラム委員会から投稿論文346件、採択論文176件、したがって採択率51%とアナウンスされた。

採択されなかった場合にどうするかが重要である。ボウリングのプロの方が「常にストライクがとれるわけではない。ストライクをとれないときに高い確率でスペアをとれるように練習を積み重ねることで スコア（アベレージ）を上げることができた」と話していたのが印象深い。

- **群馬大学からの 16 件の発表** **量的拡大は質的变化をもたらす**

#	日	曜日	Session	Room	時間帯	Paper ID	発表者
1	11/7	火	TP-L5	XUNJIANG Room	14:30~15:50	2	王健龍
2	11/8	水	WP-L6	Bay Executive Lounge	14:30~15:50	4	井田
12						高橋	
10						小澤	
5			WQ-L6	Bay Executive Lounge	16:10~17:40	17	嶋
8						福田	
7	11/9	木	HP-L2	JIYUAN Room B	8:30~9:50	5	新井
8						櫻井	
9						張	
10						石井	
11						嶋	
12			HP-L5	XURJIANG Room	10:10~11:30	258	嶋
13						小塚	
14			HQ-L5	XURJIANG Room	10:10~11:30	13	サハン
15						三木	
16						櫻井	

[1] **JianLong Wang** (王建龍), Gopal Adhikari, Nobukazu Tsukiji, Mayu Hirano, Haruo Kobayashi, Keita Kurihara, Akihito Nagahama, Ippei Noda, Kohji Yoshii, “Equivalence Between Nyquist and Routh-Hurwitz Stability Criteria for Operational Amplifier Design,”

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-kenryu.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-kenryu.pdf>



[2] **Shotaro Sakurai** (櫻井翔太郎), Seiya Takigami, Takashi Ida, Yuki Ozawa, Nobukazu Tsukiji, Yasunori Kobori, Haruo Kobayashi, Ryoji Shiota, “Study of Multi-Stage Oscilloscope Trigger Circuit”.

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-sakurai.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-sakurai-1.pdf>



[3] Yuki Ozawa, Takashi Ida, Shotaro Sakurai, Richen Jiang, **Rino Takahashi** (高橋莉乃), Haruo Kobayashi, Ryoji Shiota, "SAR TDC Architecture for On-shot Timing Measurement."

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-rino.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-rino.pdf>



[4] **Takashi IDA** (井田貴士), Yuki OZAWA, Jiang RICHEN, Shotaro SAKURAI, Seiya TAKIGAMI, Nobukazu TSUKIJI, Ryoji SHIOTA, Haruo KOBAYASHI, "ARCHITECTURE OF HIGH PERFORMANCE SUCCESSIVE APPROXIMATION TIME DIGITIZER,"

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-ida.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-ida.pdf>



小林の Session Chair



[5] **Hirotaka Arai** (新井宏崇) Takuya Arafune, Shohei Shibuya, Yutaro Kobayashi, Koji Asami, Haruo Kobayashi, “Fibonacci Sequence Weighted SAR ADC as Golden Section Search.”

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-arai.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-arai.pdf>



[6] Richen Jiang, Gopal Adhikari, **Yifei Sun (孫逸菲)**, Dan Yao, Rino Takahashi, Nobukazu Tsukiji, Haruo Kobayashi, Ryoji Shiota, “Gray-code Input DAC Architecture for Clean Signal Generation”,
<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-sun.pdf>
<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-sun.pdf>



[7] **Dan Yao (姚丹)**, Yifei Sun, Masashi Higashino, Shaiful Nizam Mohyar, Tomonori Yanagida, Takuya Arafune, Nobukazu Tsukiji, Haruo Kobayashi,
“DAC Linearity Improvement with Layout Technique Using Magic and Latin Squares.”
<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-dan.pdf>
<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-dan.pdf>



[8] **Yuki Ozawa** (小澤祐喜), Takuya Arafune Nobukazu Tsukiji Haruo Kobayashi Ryoji Shiota, “Study of Jitter Generators for High-Speed I/O Interface Jitter Tolerance Testing,.”

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-ozawa.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-ozawa.pdf>



[9] **Yasunori Kobori** (小堀康功先生), N. Tsukiji, T. Arafune, M. W. S. Durala, Y. Sun, N. Takai, H. Kobayashi, “Noise Spread Spectrum with Adjustable Notch Frequency in Complex Pulse Coding Controlled DC-DC Converters,.”

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-kobori.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017%20ISPACS%20report-kobori.pdf>



[10] **Shotaro Sakurai** (櫻井翔太郎), Nobukazu Tsukiji, Yasunori Kobori, Haruo Kobayashi, “Estimation of Circuit Component values in Buck Converter Using Efficiency Curve.”

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-sakurai-2.pdf>



[11] **Manimel Wadu Sahan Dulara** (サハン), Nobukazu Tsukiji, Kobori Yasunori, Koyo Asaishi, Nobukazu Takai, Haruo Kobayashi, “Delay-Time Suppression Technique for DC / DC Buck Converter Using Voltage Mode PWM Control”

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-sahan.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-sahan.pdf>



発表のサハンはスリランカ出身。同国はセイロン, セレンデップの名称の時期あり。セレンディピティ(serendipity)はそこでの3人の王子の物語からの造語。学生諸君には下記お薦め。

日野原重明著 『「幸福な偶然」(セレンディピティ)をつかまえる』 光文社 2005年

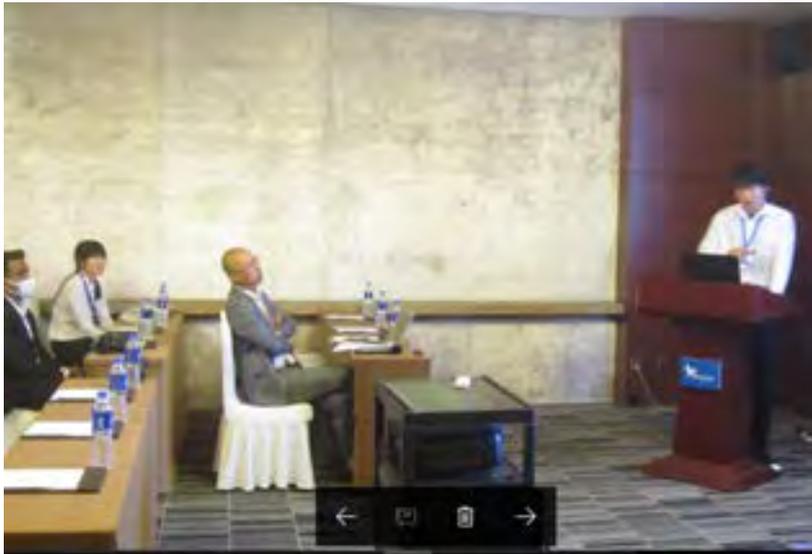
[12] **Yi Xiong**, Nobukazu Tsukiji, Yasunori Kobori, Haruo Kobayashi, “Two-Phase Soft-Switching DC-DC Converter with Voltage-mode Resonant Switch,”

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-kuma-2.pdf>

[13] **Yi Xiong (熊軼)**, Koyo Asaishi, Natsuko Miki, Nobukazu Tsukiji, Yasunori Kobori, Haruo Kobayashi, “Constant On-Time Controlled Four-Phase Buck Converter via Two Ways of Saw-tooth-wave Circuit and PLL Circuit,”

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-kuma-1.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-kuma.pdf>



[14] **Natsuko Miki (三木夏子)**, Nobukazu Tsukiji, Koyo Asaishi, Yasunori Kobori, Nobukazu Takai, Haruo Kobayashi, “EMI Reduction Technique With Noise Spread Spectrum Using Swept Frequency Modulation for Hysteretic DC-DC Converters,”

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-miki.pdf>



[15] **Tsukasa Ishii** (石井司), N. Takai, "Automatic Design of The Analog Integrated Circuit Based On Equation-Based and Characterize Results, "

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-ishii.pdf>



[16] **Masafumi Fukuda** (福田雅史), N. Takai, "OPAMP Sizing by Inference of Element Values Using Deep Learning "

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2017/2017ISPACS-report-fukuda.pdf>



● 東京都市大学 傘昊先生グループから3件の発表

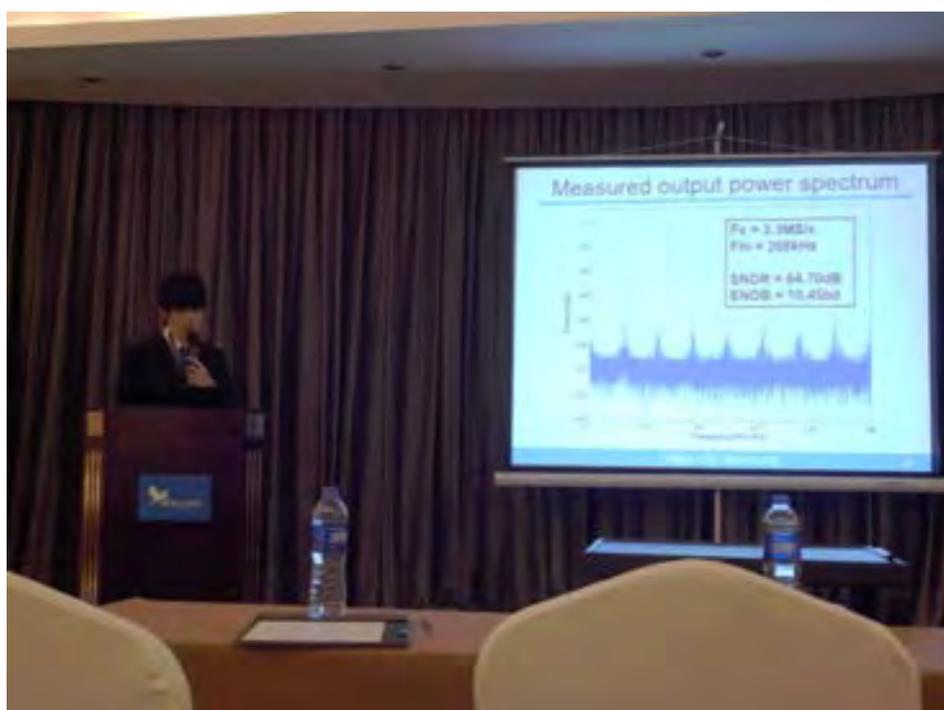
<http://www.is.cn.tcu.ac.jp/ISLwiki/index.php?News>

傘先生の Session Chair



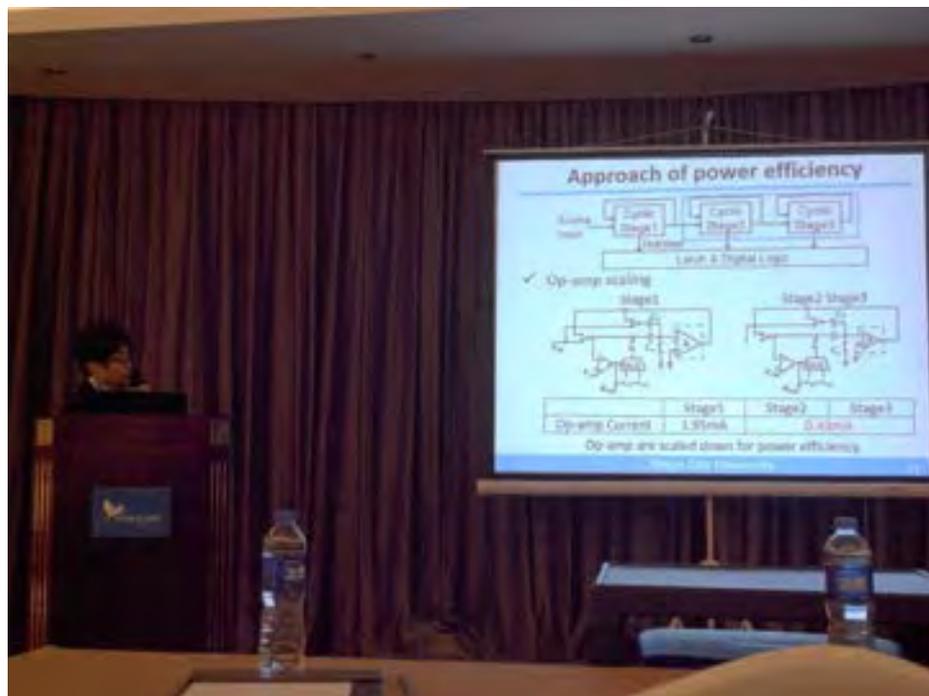
[1] **Koken Chin** (陳 広謙さん), Yuta Mishima, Yuki Watanabe, Hiroyuki Tsuchiya, Hao San, Tatsuji Matsuura, Masao Hotta (東京都市大)

“A 12-Bit 3.3MS/s Pipeline Cyclic ADC with Correlated Level Shifting Technique”.



[2] **Hiroyuki Tsuchiya** (土屋 宏之さん), Yuki Watanabe, Koken Chin, Hao San, Tatsuji Matsuura, Masao Hotta, (東京都市大)

“The design of a 14-bit 400kSPS Non-binary Pipeline Cyclic ADC”



[3] **Yuki Watanabe** (渡邊 裕樹さん), Koken Chin, Hiroyuki Tsuchiya, Hao San, Tatsuji Matsuura and Masao Hotta, (東京都市大)

“Experimental Results of Reconfigurable Non-binary Cyclic ADC”



- 林海軍先生, 東京都市大, 群馬大学グループの集合写真



- アリババ社 人工知能研究所からのキーノートスピーチ

Gated Deep Neural Networks for Adaptive Information Flow



Dr. Gang Wang

Chief Scientist

Alibaba AI Lab, China

Abstract

Human brains are adept at dealing with the deluge of information they continuously receive, and adaptively controlling and regulating the information flow to focus on the important inputs and suppress the non-essential ones for better performance. Inspired by such a capability, we develop three types of networks which computationally regulate the information flow in CNN, siamese CNN, and LSTM respectively. Our methods have achieved state-of-the-art performance on CIFAR 100 for image classification, Market-1501 dataset for human re-identification, and NTU RGB-D dataset for action recognition.

Speaker's Biography

Wang Gang is currently a researcher/senior director and a distinguished scientist in Alibaba AI Labs. He was an Associate Professor with the School of Electrical and Electronic Engineering at Nanyang Technological University (NTU). He had a joint appointment at the Advanced Digital Science Center (Singapore) as a research scientist from 2010 to 2014. He received his B.Eng. degree from Harbin Institute of Technology in Electrical Engineering and the PhD degree in Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign. He is a recipient of MIT technology review innovator under 35 award (Asia). He is an associate editor of TPAMI and an area chair of ICCV 2017 and CVPR 2018.

<http://ispacs2017.hqu.edu.cn/KeynoteSpeakers.html> より

「時の人」によるDeep Learning, AI 関係の内容の発表である。この分野を研究開発するためには統計学を理解する必要がある。筆者が所属している群馬大学理工学部電子情報理工学科電気電子工学コースでは統計（および確率）の教育が弱いと感じている。

学生諸君へ： まずは下記から読んでみてください。

群馬大学理工学部図書館に入れてもらうよう要請しました。

西内啓 統計学が最強の学問である（実践編）ダイヤモンド社（2013）

西内啓 統計学が最強の学問である（ビジネス編）ダイヤモンド社（2016）

その後専門の学術書を読んでください。

● 今度のAIは本物か？

時代の変化の兆候。それが本物かは人の行動を見ればある程度わかる。

話すけど行動に移さない → まだまだ

話をするだけでなく行動もともなう → 本物に近い

● 中国半導体産業事情

- 半導体の重要性を認識

- 数年間で中国政府が10兆円の投資

昨年度は半導体プロセス,今年は設計。大学も整備。

ベンチャー創設も国が支援。

- -中国政府トップの大学時代の友人である半導体分野の権威

中国清華大学教授, 中国半導体産業協会（CSIA）副会長

魏 少軍（Shaojun Wei）氏

をブレーンにして次々に施策を打っている。

同氏は中国のトップたちに強い信頼が受け,これから中国の半導体産業

政策に強い影響力をもつことになるとの情報を現地で得る。

帰国後,下記の報道も知る。

<http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/event/15/060900133/062100007/?rt=nocnt>

5年後, 10年後の世界情勢を変えるかもしれない。

ニュース/書籍等で知る中国政府トップには精華大学卒業生が

多いことに気が付く

● 現代中国社会・中国人論

15年程度前になるが、長年 大手商社で共産圏と仕事をされてこられた方に現代中国のお話をうかがったことがある。そのときのメモを示す。

- 歴史

中国： 王朝, 資本主義, 共産主義

海外に同胞, 華僑は大陸がよりどころ

ロシア（ソ連）： 王朝, 共産主義

イスラエル： 領土が不安定

- 世界に情報網： 華僑, 独特のネットワーク
- 共産主義（60年間）, もともとは商業主義
- 中国社会は能率主義, 実力主義
- 実質的に 中国：資本主義 日本：社会主義
- 米国に発想に近い, 個々の発想, 日本は団体の発想,
- 「終身雇用」なし, キャリアパス, 「企業は永遠」ではない。
- 工学部出身者にトップ多し
- 国家予算が5年計画
- 中国, 米国：妥協のための話し合いはしない。自己主張する。
日本：妥協のために話し合う。
- 井戸を掘った人を忘れるな
- リスク管理
日本： 建物を造ってから塀をつくる。
中国： 塀を作ってから建物を造る。
歴史的には都市をつくる時も同じ。
- 国営企業内に幼稚園から大学まで中にある。

● 学会のバンケットで





気が付くと 研究室に女子学生も増えている。 解語の花



● 中国からの留学生と一緒に



中国に行くと人が多いことを実感する。
若者はその中から頭角をあらわし世に出ようとしているのかと思う。

● 会場のホテルは海の近く

この地区のマンションは相当高額とのこと。



● 学生の街 厦門： 学生数 20 万人

厦門大学（日本では「魯迅」で著名），厦門理工学院（林海軍先生），華僑大学（ISPACS2017 主催），集美大学（幼稚園から大学院まで）等多くの大学あり。



厦門大学, 集美大学等はこの地出身の華僑リーダー 陳嘉庚氏が「教育は立国の基」と創設。マレーシアでゴムの事業で成功。大東亜戦争で毛沢東, 蔣介石に大きな経済援助。歴史の光と影か。



Social Event にも参加







厦門は経済特区 (Xiamen Special Economic Zone)





● コロンス島（鼓浪嶼）へはフェリーで

フェリー乗車券購入, 昨年度の杭州での新幹線乗車券購入ではパスポートが必要である。中国からの留学生が同行してなければ購入は難しかった。







● 厦門と台湾

鄭成功(ていせいこう)は明朝末期のこの地の豪族。清朝から逃れ台湾へ。台湾の成功大学はその名から。厦門高崎国際空港では「台湾。。」との名の台湾名産のお土産が売られており,厦門と台湾との交流が深いことが推測できる。

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2016/TJCAS2016report-tsukiji.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/2016/20160805tsukiji-taiwan.pdf>





● 音楽, ピアノとコロンス島

コロンス島（鼓浪嶼）は音楽の島でもある。著名な音楽家を輩出し、ピアノ生産が盛ん、ピアノ博物館、音楽学校がある。



ピアノ博物館



音楽学校



大陸の大学の芸術関係学部の分校

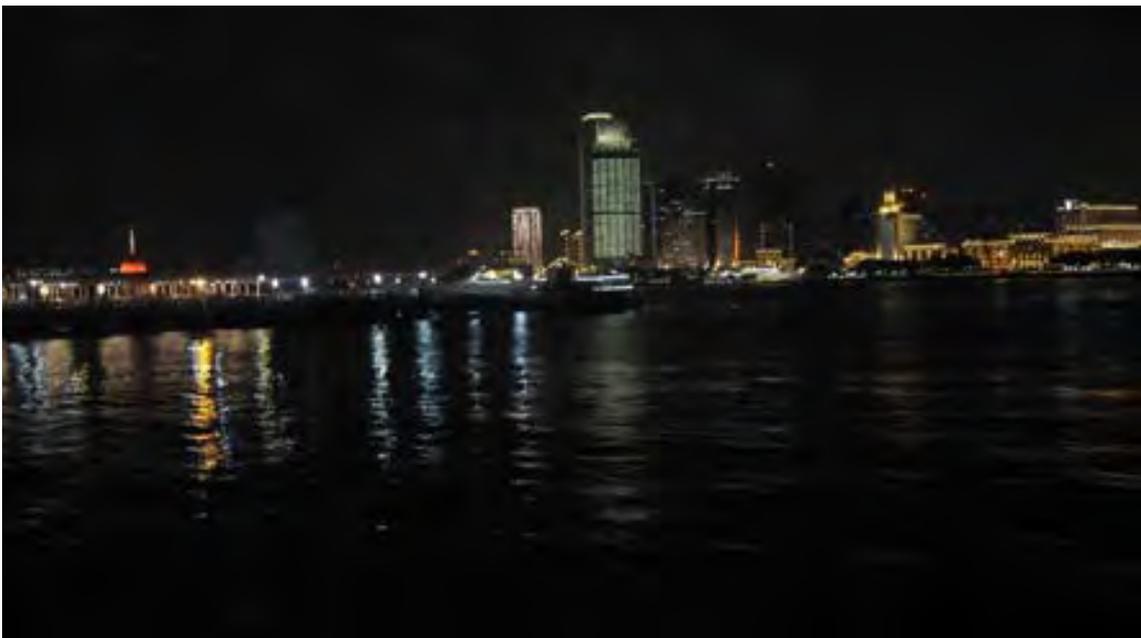




西洋風の建物多し



中国元のお札の紙の材料の木。
触るとお金持ちになるとのこと。







林海軍先生（左） 筆者（右）

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/warehouse/2014-08-08Lin.pdf>

<http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/warehouse/2009navy-lin.jpg>

<http://www.kiryu-rc.org/weeklynews/2005/2005-10-3.pdf>

<http://www.kiryu-rc.org/weeklynews/2004/2004-12-6.pdf>



林海軍先生から研究室にたくさんのお土産をいただきました。謝謝！

● **謝 辞** ISPACS 学会主催者にスリランカからの学生のビザ取得等で大変お世話になり感謝いたします。また,この学会参加に際しまして,中部電気利用基礎研究振興財団(熊,三木),NEC C&C 財団(櫻井),群馬大学工業会(王,孫)に旅費・参加費をご支援いただき感謝します。

● **エピローグ 厦門の今昔**

- ① 2017年12月2日(土)に林海軍先生からの依頼で,研究室に厦門市から5名の訪問を受ける。日本の大学等を調査に来たようであり次の印象をもつ。
- 厦門市は国の方針にしたがい集積回路の産業の成長に熱心である。
 - この分野の起業を行政が支援している。
 - 産業界と大学との連携も熱心である。
 - 中国の大学,学部,教員とも計画・実績等の評価が厳しくされている。
 - この分野の大学の研究・教育を行政が支援している。



厦門市からの来客、中国からの留学生と一緒に

使用した研究室紹介ファイル: <http://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/warehouse/2013amoi-HP7.pdf>

② 厦門にはクラシックな洋風の建物が多い。

福建省厦門・泉州にはキリスト教, イスラム教が約千年前から伝わっている。宿泊ホテルの隣はキリスト教 教会 (中国で初めて見る)。厦門はアヘン戦争後に開港させられる。様々な文化の流入・交流の地であったことが推測できる。



③ ヘボン【James Curtis Hepburn】(1815-1911) は一時 厦門で働く



幕末明治期のキリスト教宣教師・医師・日本語研究者・聖書翻訳者。ペンシルベニア州ミルトン生まれ。父の名はサミュエルで判事, 母はアンニ・クレイ。プリンストン大学卒業後, ペンシルベニア大学で医学を学ぶ。東洋伝道に志し, 1841 年満 25 歳で夫人クララ・リートを伴ってシンガポール・厦門に赴く。5 年後帰国しニューヨークで医院を開く。1859 年 44 歳で開国直後に来日。横浜で西洋医術を日本人に施す傍ら聖書の翻訳をめざして日本語研究に着手。慶応 3(1867)年にローマ字表記 (ヘボン式) の『和英語林集成』を出版。明治 13 (1880) 年 S.R. ブラウンと協力して新約聖書, 同 21 年フルベッキと協力し旧約聖書の文語体訳を完成。彼と夫人の教え子に大村益次郎, 林董, 高橋是清など明治政府のリーダーがいる。33 年間の在日中 横浜指路教会や明治学院を発足させるなど日本でのプロテスタントの伝道と教育の基礎を築く。

明治 25 年に帰米, 以後ニュージャージー州イーストオレンジに住み 96 歳で没。

<https://kotobank.jp/word/%E3%83%98%E3%83%9C%E3%83%B3-130100> より

平成 29 年 11 月 14 日

ISPACS-2017 参加報告書

群馬大学大学院 理工学府
理工学専攻 電子情報・数理領域
小林研究室 博士後期課程 3 年
王建龍

1. 参加学会名称

IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and
Communication Systems 2017 (ISPACS-2017)

2. 開催場所

Wanda Realm Xiamen North Bay Hotel, Xiamen, China

3. 開催期間

2017/11/06(火)～11/09(金) (滞在期間は 2017/11/06(月)～11/11(土))

4. 発表論文

Equivalence Between Nyquist and Routh-Hurwitz Stability Criteria for Operational Amplifier Design

JianLong Wang, Gopal Adhikari, Nobukazu Tsukiji,

Mayu Hirano, Haruo Kobayashi, Keita Kurihara (Gunma University)

Akihito Nagahama, Ippei Noda, Kohji Yoshii (Ricoh Electronic Devices Co.)

5. 発表日

2017/11/07(火) XUNJIANG Room



私の発表の様子

Last week, I went to Xiamen with Professor Kobayashi, Professor Kobori and many students from Kobayashi Lab and Takai lab at Gunma University, to attend ISPACS (International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication). Good time always passes quickly. So in order to remember significant and interesting time, and also to summarize important information and experiences obtained from the conference, I have written this report as follows:

XIAMEN

This is my first time to Xiamen; it is a beautiful, clean and tidy city, where I always wanted to go. It is divided into six districts: Huli, Siming, Jimei, Tong'an, Haicang, and Xiang'an. This time, we stayed in Jimei, and the hotel where the conference was held is also located in this district.

I always long for the sea, and when I am overlooking the endless sea, which stretches to the horizon and as far as the eyes can reach, all sorts of feelings will up in my mind. After the conference registration, we went to the beach that besides the hotel's back garden.



Agreeable scenery

Xiamen is a suitable city for living. Proper climate and wonderful scenery attract many people there for working and living.

By communication with local people, I knew that house price is very very expensive, especially in the section named "iniland" by the local people. Many people living in Fujian province are rich, and they would like to buy an apartment in Xiamen for graceful environment, so the price becomes expensive; this is main reason for the expensive house price, I suppose.

CONFERENCE

This symposium was held on November 6-9, 2017, at North Bay hotel. In the morning on November 7, opening ceremony and two keynote speeches were held at JIMEI Ballroom A.

My presentation was arranged in "LP-L5: Adaptive, Non-linear and Multidimensional Signal Processing 1" session, and I introduced my research results at XUNJIANG Room. At Q&A time, the chairman asked me two questions, but I only understood the first one.

I also remembered that I wrote “English and communication are very very important” in my report last year after the conference ICSICT-2016. Even so, my spoken English level has not be proved over the past year. Action is more important than saying.



ホテルの庭で



Opening Ceremony

Keynote Speech 1: Why Deep Learning Networks Work So Well?



“No matter if it is a white cat or a black cat, a cat that can catch rats is a good cat!”—Xiaoping Deng

Keynote Speech 2: Active Efficient Coding Framework for Joint Emergence of Perception and Behavior.





Wanda Realm Xiamen
North Bay Hotel

CULTURAL EXPLORATION

- Kah Kee Park

Tan Kah Kee (陳嘉庚) was a Chinese businessman, community leader, educator and philanthropist. A great and respectable man who contributed to the establishment of several schools in Southeast Asia and China's Fujian province, including Xiamen University.



Kah Kee Memorial Hall

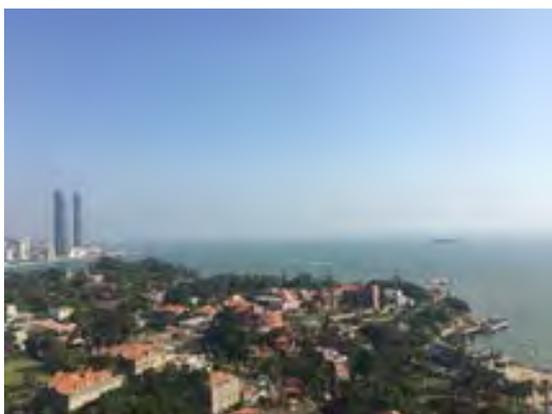
- Kulangsu (鼓浪嶼)

We reached Kulangsu; it took 20 minutes by ferry from the ferry terminal.

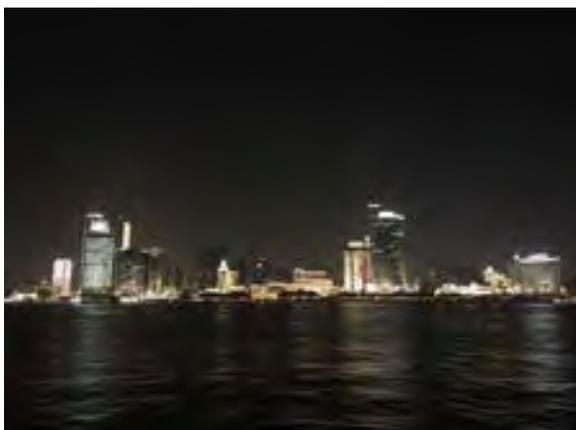
Local residents are allowed to use a shorter 5-minute ferry to/from the specific ferry terminal. Kulangsu is an emotional island that emits a full-humanistic feeling. I think that the local resident's life is leisurely and piacevole, although there is a little inconvenience, because of the bans cars and bans bicycles policies. This reminds me of one ancient Chinese prose “鱼和熊掌不可兼得”, which be written by Mencius (孟子) in his book <鱼我所欲也>, and the corresponding English proverb: “You can't have your cake and eat it too.”

On the ferry to Kulangsu, we can watch a love story from ending of the advertising

video that I simple knew from other news before, of course, I am moved by it at that time. After returning, I read some of news about this story and find one important point: Master of the story has married when he falls in love with mistress. In my opinion, I think that is cheat and disloyalty. All above only represents my personal opinion about this love story.



Kulangsu



夜景



綺麗な天空

厦門高崎国際空港で買った本



ACKNOWLEDGEMENT

Thanks to Professor H. Kobayashi, Professor Y. Kobori and Dr. Y. Gendai for guidance and imparting knowledge. Thanks to Mr. N. Ishikawa for his travel support. Thanks to Gunma Daigaku Kogyokai (群馬大学工業会 Alumni Association) for travel aid financially.

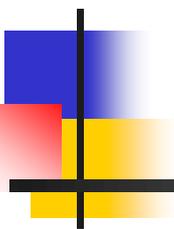
Last but not least, thanks to 林海軍先生 (厦門理工学院) for his warmful hospitality.



ハート



楽しかった見学



制御工学は電子回路設計の 基礎理論

安定性の理論

群馬大学 小林春夫

ジェームズ・ワット

James Watt 1736 - 1819



- イギリスの発明家、機械技術者。
- 蒸気機関の改良を通じて
全世界の産業革命の進展に寄与。

蒸気機関技術機関設計ではシリンダーが冷却と加熱を繰り返す。熱量が大量に無駄。凝縮器を分離し熱量損失低減、蒸気機関の出力、効率、費用対効果を高めた。

出力速度が一定になる回転運動が必要

调速機 (Governor) の発明 → フィードバック制御

ガバナーとフィードバック制御

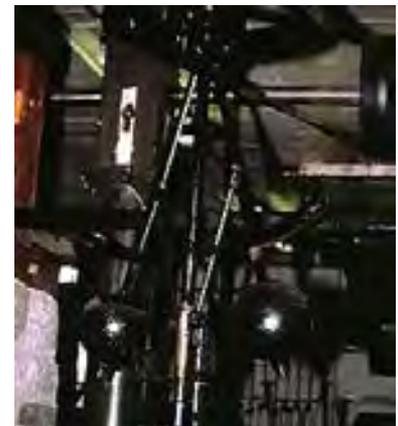
ガバナー (Governor 調速機)

蒸気機関で、回転速度を一定に保つようにした装置。
回転数が下がると自動的に弁が開き回転数を上げ、
回転数が上がると弁が閉じることで回転数を一定に保つ。

➡ フィードバック制御

この装置は、条件により発振することがあり。
理由を調べることで制御工学が確立。

➡ フィードバック制御での安定性の問題



ノーバート・ウィーナー

Norbert Wiener 1894 - 1964



- アメリカ合衆国の数学者、サイバネティックスの創設者
- ブラウン運動、フーリエ積分、調和解析
通信工学、制御理論、ロボテクス、オートメーション
- **サイバネティックス**: 通信工学と制御工学を融し、
生理学、機械工学、システム工学を統一的に扱う学問。
ギリシャ語で「船の舵を取る者」の意
フィードバックの考えが様々なところで応用・総合のために
使えると考えた。
- 「科学者は、宇宙の秩序と組織性を発見する仕事に
取り組み、無秩序化という敵を相手に
ゲームをやっている。」

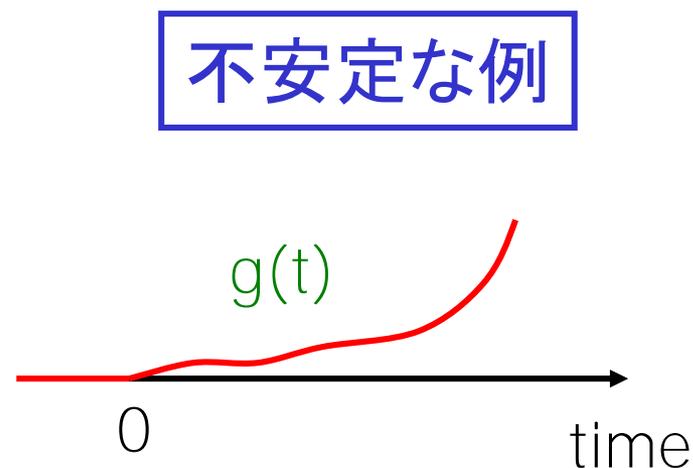
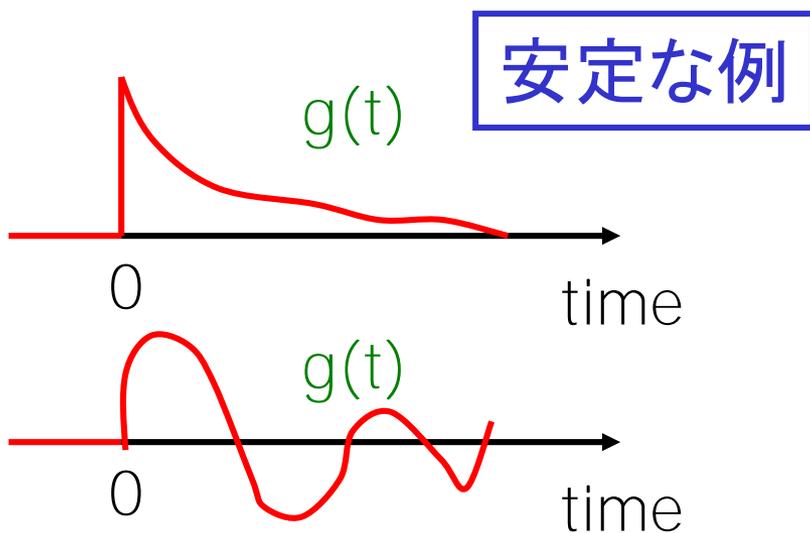
線形時不変動的システムの 安定性の定義

安定な線形時不変動的システム

⇕ 定義

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0$$

$g(t)$: インパルス応答



2階微分方程式で表されるシステム の伝達関数(1)



$$b_1 \frac{d}{dt} x(t) + b_0 x(t) = \frac{d^2}{dt^2} y(t) + a_1 \frac{d}{dt} y(t) + a_0 y(t)$$

$$x(t) \xrightarrow{\text{Laplace 変換}} X(s) \qquad y(t) \xrightarrow{\text{Laplace 変換}} Y(s)$$

$$\frac{d}{dt} x(t) \xrightarrow{\text{Laplace 変換}} s X(s) \qquad \frac{d}{dt} y(t) \xrightarrow{\text{Laplace 変換}} s Y(s)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} x(t) \xrightarrow{\text{Laplace 変換}} s^2 X(s) \qquad \frac{d^2}{dt^2} y(t) \xrightarrow{\text{Laplace 変換}} s^2 Y(s)$$

2階微分方程式で表されるシステムの の伝達関数(2)



$$b_1 s X(s) + b_0 X(s) = s^2 Y(s) + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s)$$

$$(b_1 s + b_0) X(s) = (s^2 + a_1 s + a_0) Y(s)$$

$$G(s) = Y(s)/X(s)$$

$$= \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}$$

2階微分方程式で表されるシステム のインパルス応答



$$X(s) = 1$$

$$G(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}$$

$$\therefore Y(s) = G(s) X(s)$$

$$= \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}$$

$$= \frac{b_1 s + b_0}{(s-p_1)(s-p_2)}$$

p_1, p_2 は特性方程式
(伝達関数の分母=0)
 $s^2 + a_1 s + a_0 = 0$
の根

特性方程式が異なる実根をもつ場合 (p_1, p_2 が異なる実根の場合)

$$Y(s) = \frac{b_1 s + b_0}{(s-p_1)(s-p_2)}$$
$$= \frac{K_1}{s-p_1} + \frac{K_2}{s-p_2}$$

K_1, K_2 は定数。
演習問題: K_1, K_2 の値を
 b_1, b_0, p_1, p_2 で表せ。



$$y(t) = K_1 \exp(p_1 \cdot t) + K_2 \exp(p_2 \cdot t)$$

安定性の必要十分条件
 $p_1 < 0$ かつ $p_2 < 0$

特性方程式が重根をもつ場合 ($p_1 = p_2$, 実根の場合)

$$Y(s) = \frac{b_1 s + b_0}{(s-p_1)^2}$$
$$= \frac{L_1}{s-p_1} + \frac{L_2}{(s-p_2)^2}$$

L_1, L_2 は定数。
演習問題: L_1, L_2 の値を
 b_1, b_0, p_1, p_2 で表せ。



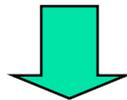
$$y(t) = L_1 \exp(p_1 \cdot t) + L_2 \cdot t \cdot \exp(p_1 \cdot t)$$

安定性の必要十分条件

$$p_1 (=p_2) < 0$$

特性方程式が複素共役根をもつ場合 (p_1, p_2 が複素共役根の場合)

$$Y(s) = \frac{b_1 s + b_0}{(s-a)^2 + b^2}$$
$$= \frac{M_1 (s-a)}{(s-a)^2 + b^2} + \frac{M_2 b}{(s-a)^2 + b^2}$$



$$y(t) = M_1 \exp(a \cdot t) \cos(b t)$$
$$+ M_2 \exp(a \cdot t) \sin(b t)$$
$$= M \exp(a \cdot t) \cos(b t + \quad)$$

$$p_1 = a + j b$$

$$p_2 = a - j b$$

M_1, M_2 は定数。

演習問題: M_1, M_2 の値を b_1, b_0, a, b で表せ。

安定性の必要十分条件

$$a < 0$$

2階微分方程式で表されるシステムの 安定性の必要十分条件

$$G(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}$$

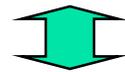
p_1, p_2 を特性方程式 (伝達関数の分母=0)

$$s^2 + a_1 s + a_0 = 0$$

の根とすると、

「 p_1, p_2 の実数部が負であること」
が安定性の必要十分条件。

演習問題: 「 p_1, p_2 の実数部が負であること」



「 $a_1 > 0$ かつ $a_0 > 0$ 」
であることを示せ。

一般に n 階微分方程式で表されるシステムの安定性の必要十分条件

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

特性方程式 (伝達関数の分母=0)

$$s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

の根の全ての根 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ の実数部が負であることが安定性の必要十分条件。

(注) 伝達関数の分子は安定性には無関係

一般に n 階微分方程式で表される システムの安定性の補足

$p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ が特性方程式の異なる実根のとき

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{(s-p_1)(s-p_2)(s-p_3)\dots(s-p_n)}$$
$$= \frac{K_1}{s-p_1} + \frac{K_2}{s-p_2} + \frac{K_3}{s-p_3} + \dots + \frac{K_n}{s-p_n}$$



インパルス応答 $g(t) =$
 $K_1 \exp(p_1 \cdot t) + K_2 \exp(p_2 \cdot t) + K_3 \exp(p_3 \cdot t) + \dots + K_n \exp(p_n \cdot t)$

一般に n 階微分方程式で表されるシステムの安定性の必要十分条件

特性方程式 (伝達関数の分母 = 0)

$$S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0 = 0$$

の根の全ての根 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ の実数部が負であることが安定性の必要十分条件。

このための $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_1, a_0$ の必要十分条件は何か。



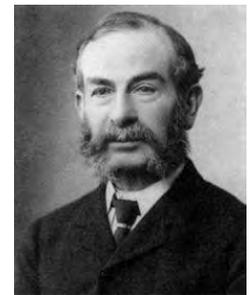
Routh - Hurwitz の安定判別

(注) 5次以上の代数方程式の一般解は存在しない。
数学者アーベル、ガロアによって証明された。

Maxwell と Routh



Maxwell



Routh

Maxwell (電磁気学のMaxwell の方程式で著名)とRouthはイギリスのCambridge 大学の同級生で首席を争ったライバル。19世紀後半に活躍。

Maxwell は制御の安定性の問題 (一般の n 階微分方程式の特性方程式の全ての根の実数部が負になる条件)が解けなかった。

懸賞問題(アダム賞)として出題した。



Routh がこの問題を解き、その内容を懸賞論文に応募した。

ジェームズ・クラーク・ マクスウェル

James Clerk Maxwell 1831 -1879



- イギリスの理論物理学者
- マイケル・ファラデーの電磁場理論をもとに
1864年 マクスウェルの方程式を導出
→ 古典電磁気学を確立。
- 電磁波の存在を理論的に予想。
伝播速度が光速と同じ、横波であることを示す。
- 土星の環、気体分子運動論、熱力学、統計力学
などの研究

「マクスウェルの悪魔」

→ 熱力学、統計力学、情報科学の根本問題

Routh の安定判別

Characteristic equation:

$$D(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

Routh table

s^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	a_{n-6}	...
s^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	a_{n-7}	...
s^{n-2}	$b_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}}$	$b_2 = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}}$	b_3	b_4	...
s^{n-3}	$c_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1}$	$c_2 = \frac{b_1 a_{n-5} - a_{n-1} b_3}{b_1}$	c_3	c_4	...
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
s^0	a_0				

Sufficient and necessary condition:

(i) $a_i > 0$ for $i = 0, 1, \dots, n$

&

(ii) All values of Routh table's first columns are positive.

Mathematical test



Determine whether given polynomial has all roots in the left-half plane.

Stodola と Hurwitz



Stodola



Hurwitz

スイスの制御の研究者 **Stodola** は制御の安定性の条件が「特性方程式の全ての根の実数部が負になること」と見いだしたが この問題が解けなかった。

同じ大学(**スイス連邦工科大学** ETH の前身)の数学者 **Hurwitz** に相談し、Hurwitz はこの問題を解いた。

Routh がこの問題を解いてから10数年後のことである。
両者ともRouth の結果を知らなかった。
後にRouth, Hurwitz の結果は同等であることが証明された。

Routh, Hurwitz の計算アルゴリズムは制御工学のテキストを見てください

Hurwitz の安定判別

Characteristic equation:

$$D(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

安定であるための必要十分条件

(i) $a_i > 0$ for $i = 0, 1, \dots, n$

&

(ii) $D_i > 0$ for $i=1, 2, \dots, n-1$

$$D_1 = a_{n-1}$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix}$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}$$

⋮

$$D_i = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & a_{n-2i+1} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & a_{n-2i+2} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & a_{n-2i+3} \\ 0 & a_n & a_{n-2} & \dots & a_{n-2i+4} \\ 0 & 0 & a_{n-1} & \dots & a_{n-2i+5} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-i} \end{vmatrix}$$

早熟/悲運の天才 ガロア



エヴァリスト・ガロア (1811-1832, フランス)

論文をフランス学士院に提出、コーシーが紛失。
再提出するも預かったフーリエが急死し紛失。



一人の女性をめぐる決闘で敗れて死す (20才)



死後、その数学上の業績が認められる。

5次以上の方程式には

一般的な代数的解の公式は存在しない

ジェロラモ・カルダーノ

Gerolamo Cardano 1501 - 1576



16世紀イタリアの数学者、医者、占星術師、賭博師、哲学者

1545年「偉大なる術(アルス・マグナ)」の著書で

3次方程式の解の公式、4次方程式の解法を示す。

タルタリアに3次方程式の解法を聞く（公開しないとの約束で）

4次方程式の解はカルダーノの弟子ルドヴィコ・フェラーリが
解いたもの

3次方程式の解を示す際に

はじめて虚数の概念を導入したのはカルダーノ

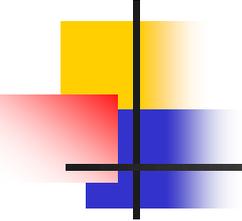
ニコロ・フォンタナ・”タルタリア”

Niccolò Fontana "Tartaglia"

1499-1557



- イタリアの数学者、工学者、測量士。
- ヴェネツィア共和国の簿記係でもあった。
- アルキメデスやユークリッドのイタリア語訳を含む多くの著書を著し、数学関係編集の分野で高く評価。
- 史上初めて数学による大砲の弾道計算を行った弾道学の祖。
- 彼の研究は、後にガリレオ・ガリレイによる落体の実験により検証された。
- 「タルタリア」は生後につけられた渾名。



制御工学

- 線形システムの安定判別

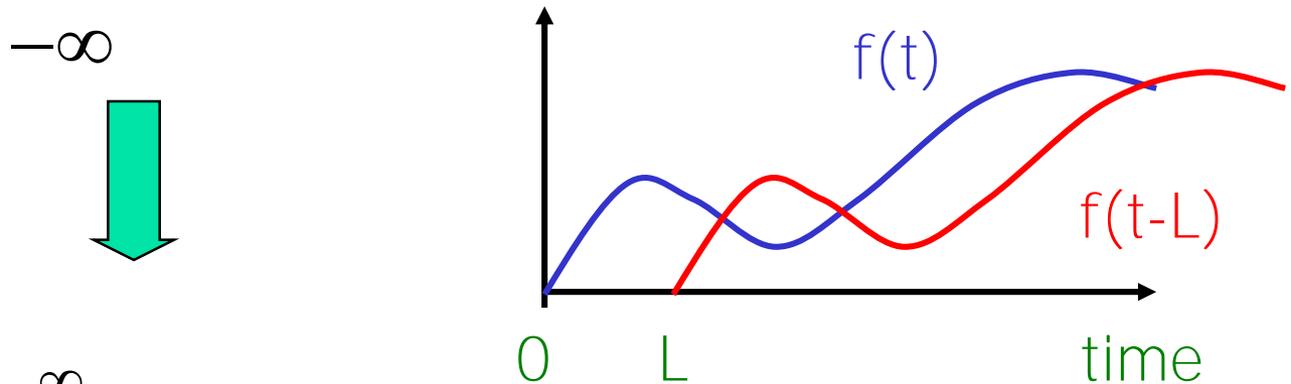
 - Nyquist の安定判別

安定なシステムをフィードバックをかけたとき、安定になるか不安定になるかを判別する。

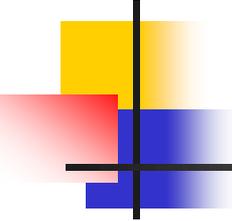
ベクトル線図、ボーデ線図を使用

ラプラス変換の性質(補足) $f(t)$ の L 時間遅れは $F(s)$ に e^{-sL} をかける

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-st) dt$$



$$e^{-sL} F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t-L) \exp(-st) dt$$



周波数伝達関数 $G(j\omega)$ と 伝達関数 $G(s)$

安定なシステム:

$G(j\omega)$, $G(s)$ の両方が存在

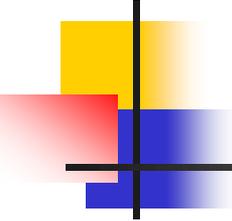
$G(j\omega)$ は周波数応答法と結びつき
物理的な意味がある。

$G(s)$ には物理的な意味はない。

$G(s)$ で $s=j\omega$ とおけば $G(j\omega)$ が求まる。

不安定なシステム:

$G(s)$ は存在する。 $G(j\omega)$ は存在しない。



Harry Nyquist (AT&T, 1889-1976)

1927年 米国ベル研究所 Harold Black により、
Negative Feedback による電子管増幅器が考案される。

出力から入力へのフィードバック量により増幅器が
安定、不安定になることが経験される。

1932年 Nyquist によりこの問題が理論的に検討され、
安定になるための条件が明らかになる。

電気通信の技術課題を解決するためのもの
 制御工学に取り入れられる。

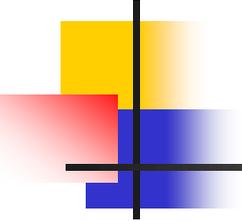
負帰還増幅器の発明者

ハロルド・ブラック

1898-1983



- 電話産業ウエスタン・エレクトリックに在籍
(ウエスタン・エレクトリックはベル研究所で有名なAT&T社の製造部門)
 - 負帰還の発明者
 - 生涯特許は347件



Harry Nyquist

名前が残る多くの研究業績

Nyquist plot

Nyquist–Shannon sampling theorem

Nyquist frequency

Nyquist stability criterion

Nyquist ISI criterion

Johnson–Nyquist noise



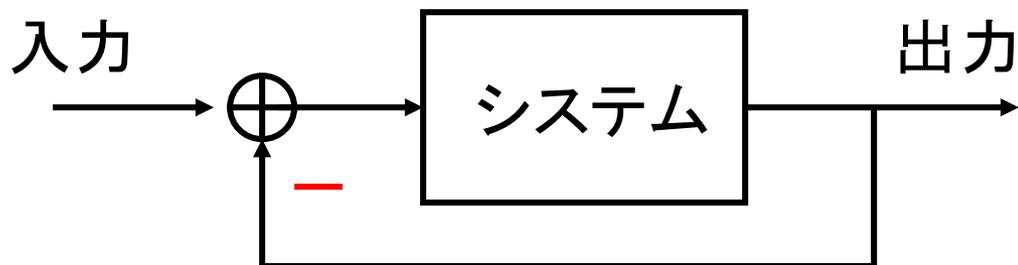
フィードバックと安定性

安定なシステムにフィードバックをかける。

➡ 安定にも不安定にもなりうる。

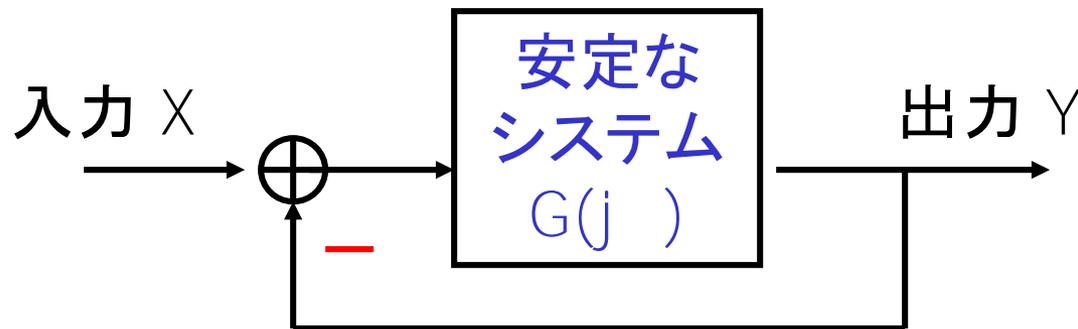
不安定なシステムにフィードバックをかける。

➡ 安定にも不安定にもなりうる。



ナイキストの安定判別の 問題設定(1)

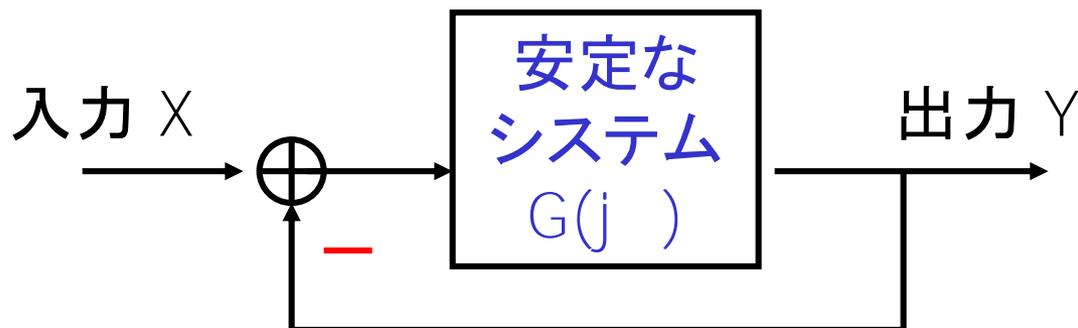
安定なシステム $G(j)$ にフィードバックをかける
周波数伝達関数 $G(j)$ から、
フィードバックをかけた
システム全体の安定性を判定する。



システム全体は安定 ？

ナイキストの安定判別の 問題設定(2)

周波数伝達関数 $G(j\omega)$ は測定データ
(ボーデ線図、またはベクトル線図)
で与えられる。



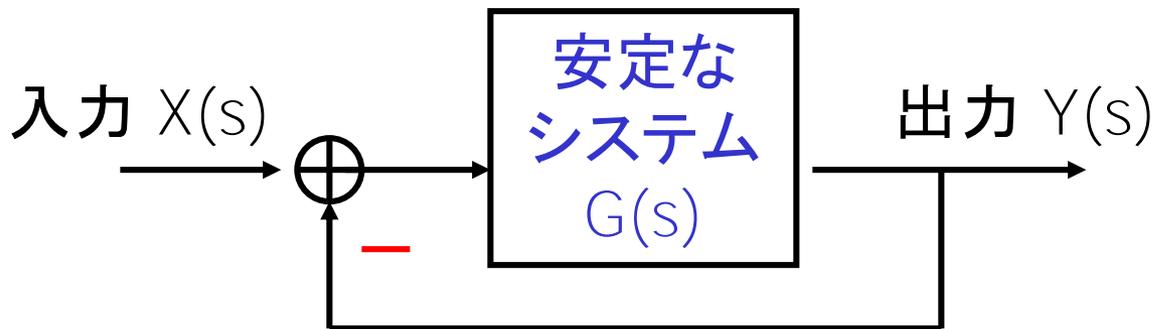
システム全体は安定 ?

Routh-Hurwitz 安定判別 との関係

$G(j\omega)$ が式 ($j\omega$ の有理多項式) で与えられたとき
 $s=j\omega$ とおき $G(s)$ を得て、

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)}$$

に対して Routh-Hurwitz の安定判別を適用。



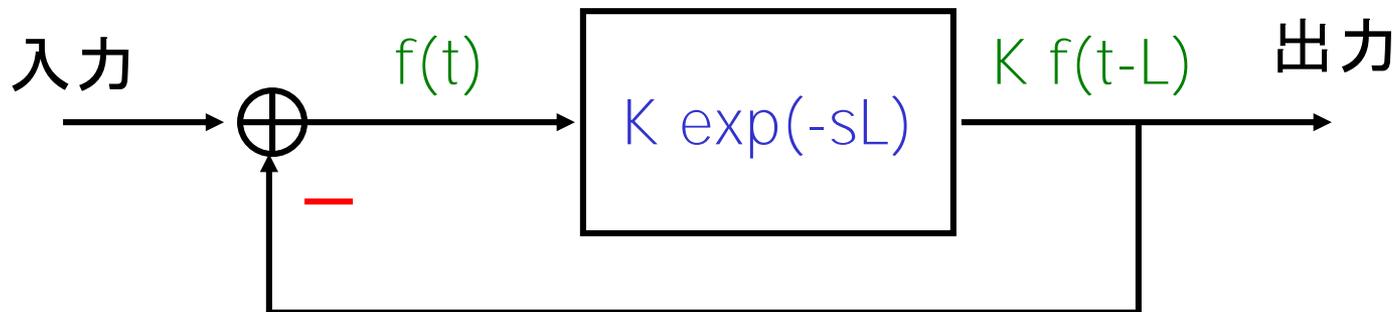
システム全体は安定 ?

Routh-Hurwitz 安定判別 の問題点(1)

$G(s)$ が s の有理多項式でない場合R-H法は適用不可

例: $G(s) = K \exp(-sL)$, $K > 0$, $L > 0$ のとき

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K \exp(-sL)}{1+K \exp(-sL)}$$



(注) 安定のための必要十分条件は $K < 1$ (後述)

Routh-Hurwitz 安定判別 の問題点(2)

$G(j)$ が測定データのみで式で表されていない場合
R-H法は**適用不可**

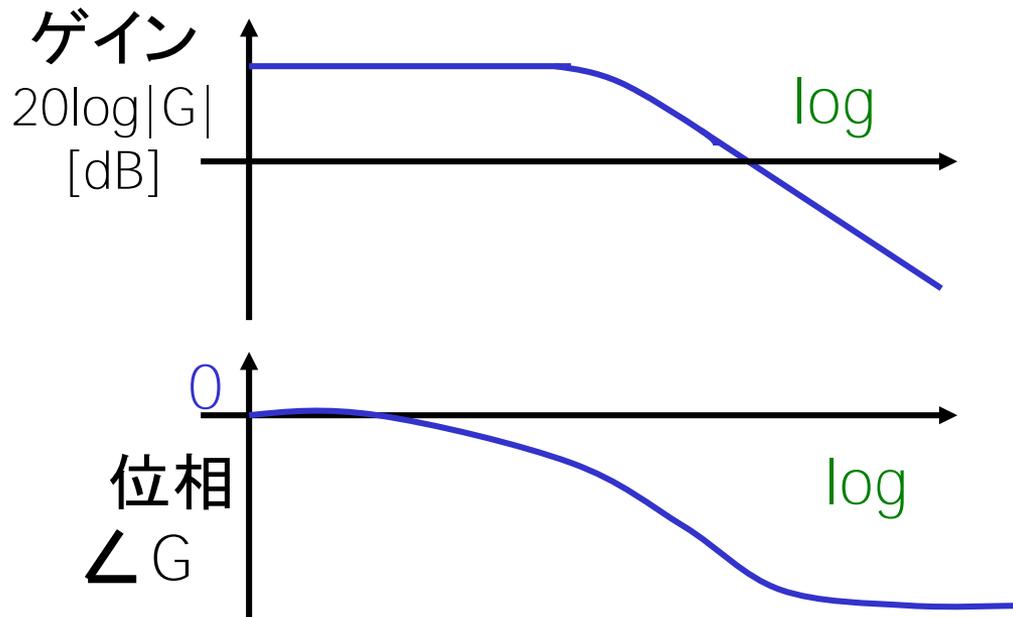
例: $G(j)$ のボーン線図またはベクトル線図の
測定データとして与えられている場合



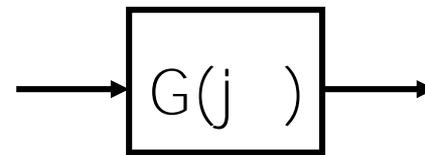
システム全体は安定？

典型的システムの周波数特性 (ゲイン特性、位相特性)

多くの(安定な)システムでは周波数 ω が大きくなると
ゲイン $|G(j\omega)|$ が小さくなる、
位相 $\angle G(j\omega)$ がマイナスの値で大きくなる。

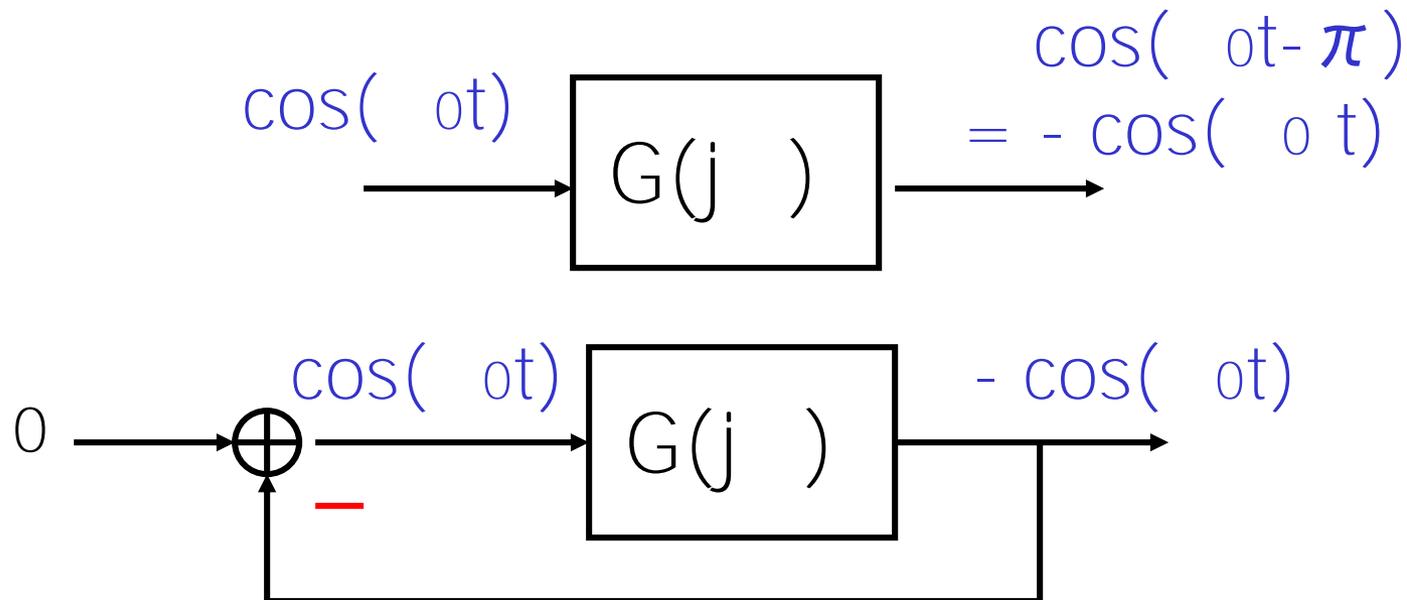


$$\cos(\omega t) \quad |G|\cos(\omega t + \angle G)$$



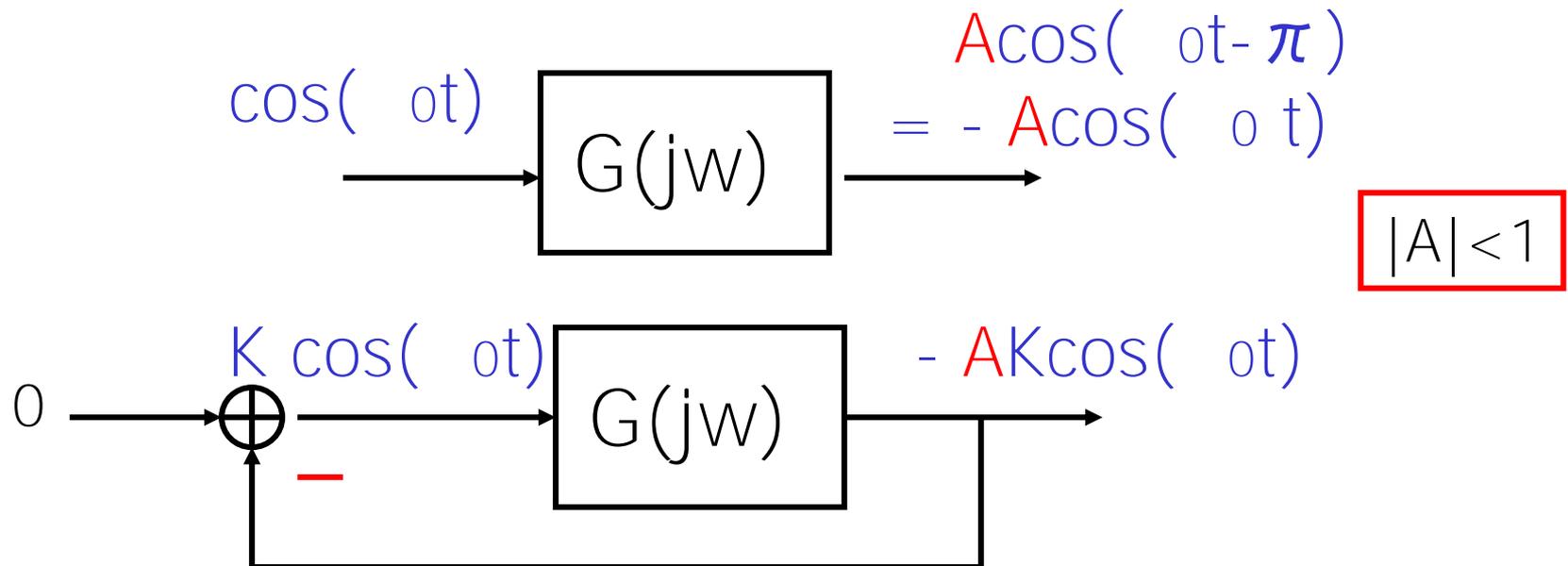
位相遅れ π の周波数で ゲインが1の場合

ある周波数 $\omega = \omega_0$ で $\angle G(j\omega_0) = -\pi$ のとき
 $|G(j\omega_0)| = 1$ の場合、
フィードバックシステムは周波数 ω_0 で発振する。



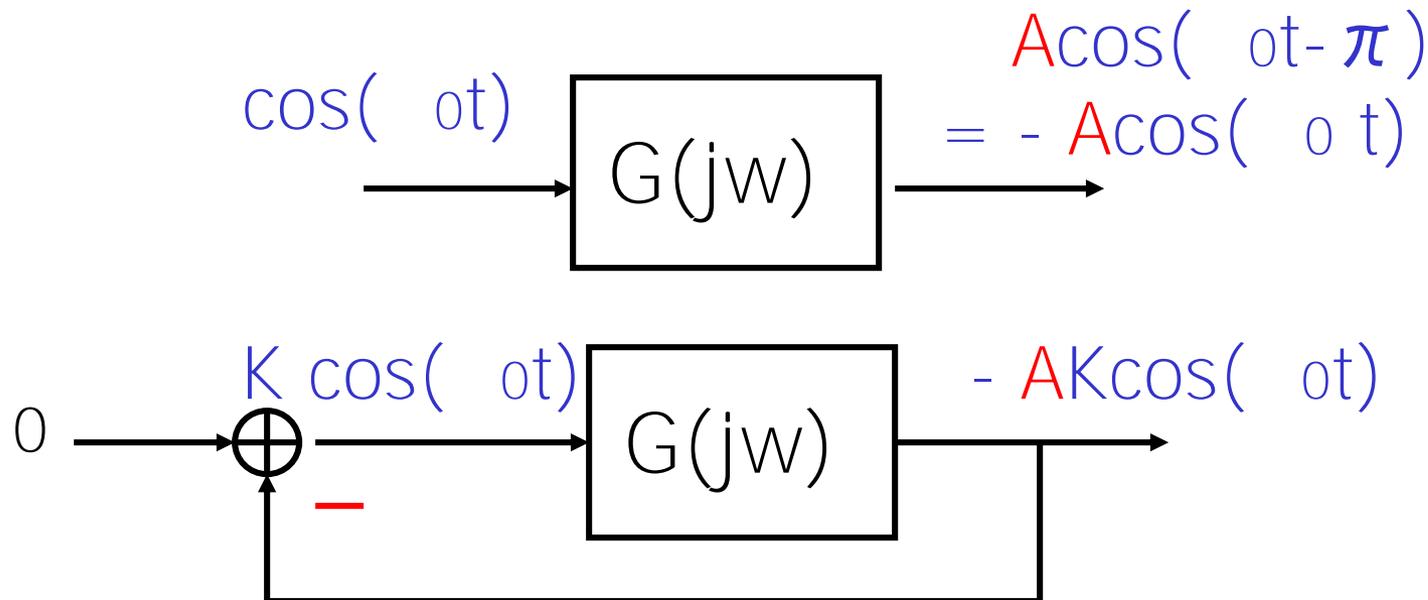
位相遅れ π の周波数で ゲインが1より小さい場合

ある周波数 $\omega = \omega_0$ で $\angle G(j\omega) = -\pi$ のとき
 $|G(j\omega)| < 1$ の場合、
 フィードバックシステムは安定である。



位相遅れ π の周波数で ゲインが1より大きい場合

ある周波数 ω で $\angle G(j\omega) = -\pi$ のとき
 $|G(j\omega)| > 1$ の場合、
フィードバックシステムは不安定である。



$$|A| > 1$$

ゲインの線形表記の場合の 安定判別

ある周波数 $\omega = \omega_0$ で $\angle G(j\omega_0) = -\pi$ のとき

(I) $|G(j\omega_0)| < 1$ の場合、
フィードバックシステムは安定である。

(II) $|G(j\omega_0)| = 1$ の場合、
..
安定限界である。

(III) $|G(j\omega_0)| > 1$ の場合、
..
不安定である。

ゲインのdB表記の場合の 安定判別

ある周波数 ω で $\angle G(j\omega) = -\pi$ のとき

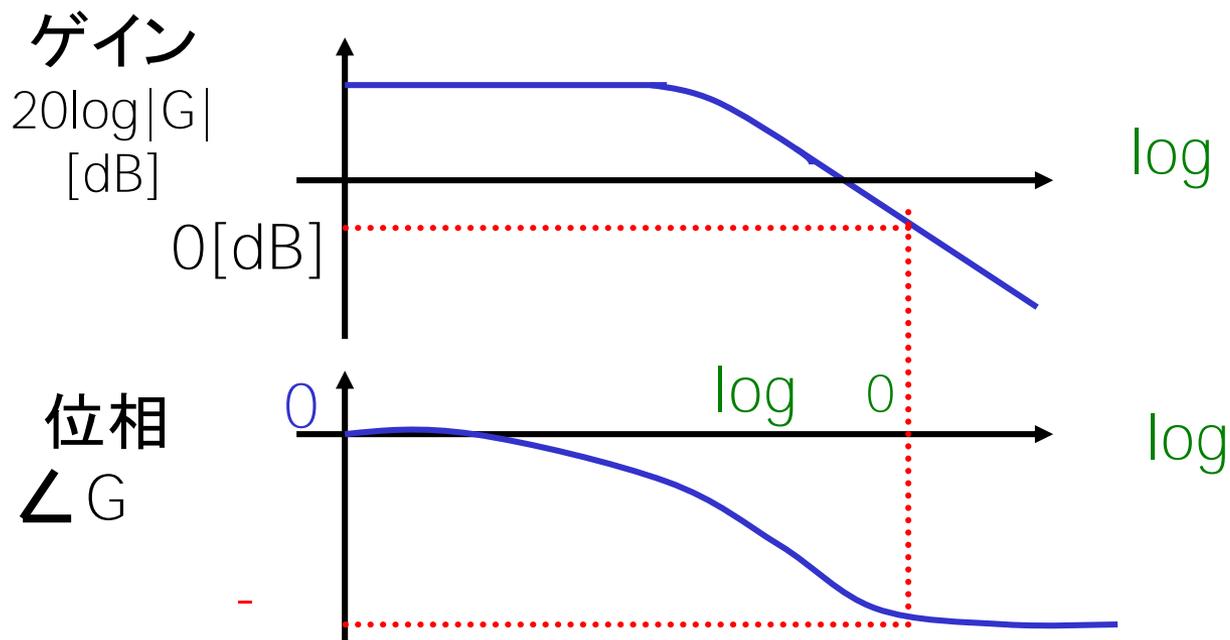
(I) $20 \log |G(j\omega)| < 0$ dB の場合、
フィードバックシステムは安定である。

(II) $20 \log |G(j\omega)| = 0$ dB の場合、
..
安定限界である。

(III) $20 \log |G(j\omega)| > 0$ dB の場合、
..
不安定である。

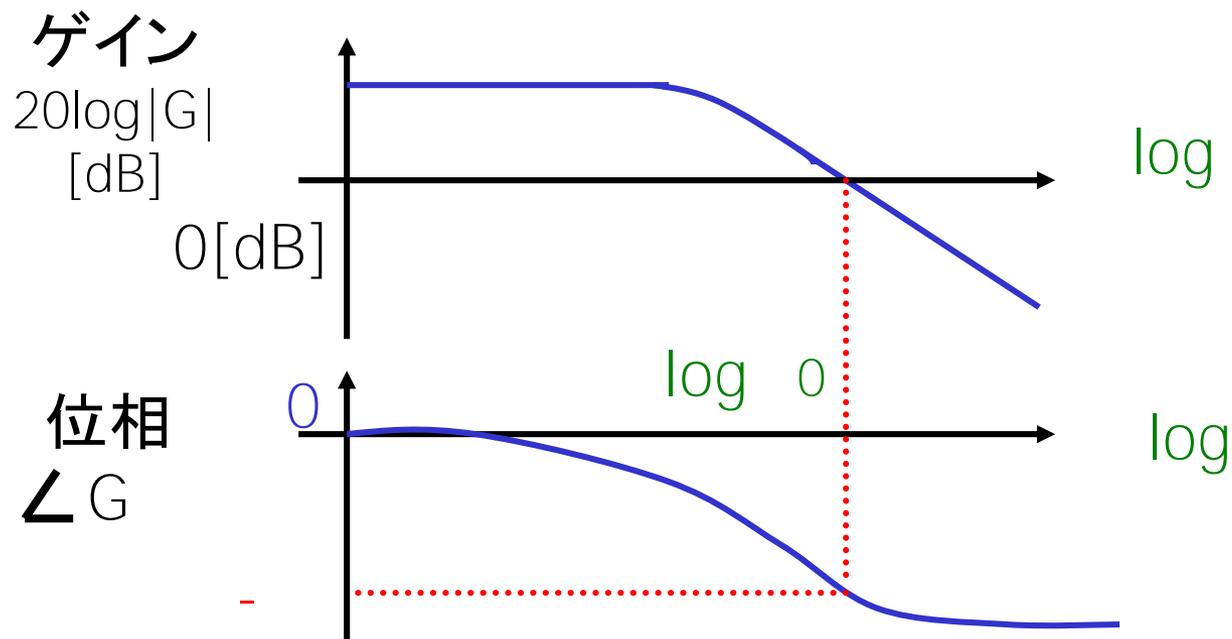
ボーデ線図による安定判別(1)

ある周波数 $\omega = \omega_0$ で $\angle G(j\omega_0) = -\pi$ のとき
 $20 \log |G(j\omega_0)| < 0 \text{ dB}$ の場合、
フィードバックシステムは安定である。



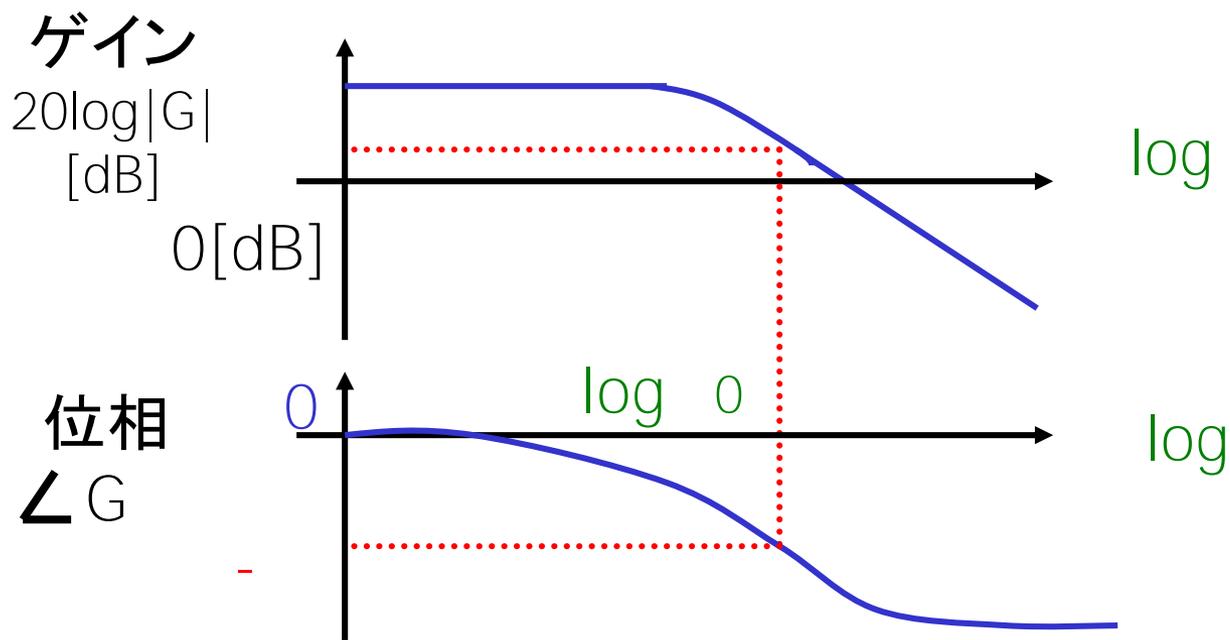
ボデー線図による安定判別(2)

ある周波数 $\omega = \omega_0$ で $\angle G(j\omega_0) = -\pi$ のとき
 $20 \log |G(j\omega_0)| = 0 \text{ dB}$ の場合、
フィードバックシステムは安定限界である。



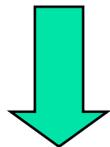
ボート線図による安定判別(3)

ある周波数 $\omega = \omega_0$ で $\angle G(j\omega_0) = -\pi$ のとき
 $20 \log |G(j\omega_0)| > 0 \text{ dB}$ の場合、
フィードバックシステムは不安定である。

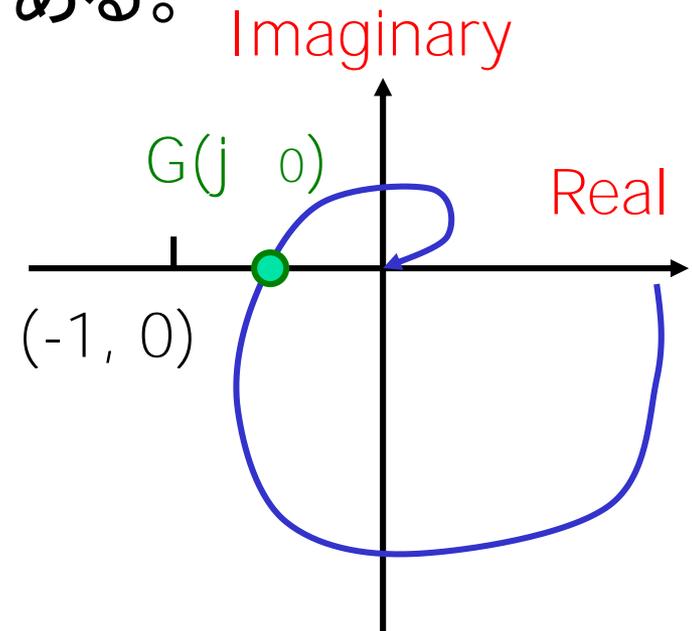


ベクトル線図による安定判別(1)

ある周波数 $\omega = 0$ で $\angle G(j\omega) = -\pi$ のとき
 $|G(j\omega)| < 1$ の場合、
フィードバックシステムは安定である。

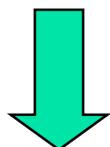


$G(j\omega)$ のベクトル線図が
 $(-1, 0)$ の内側を通るとき
フィードバックシステムは安定。

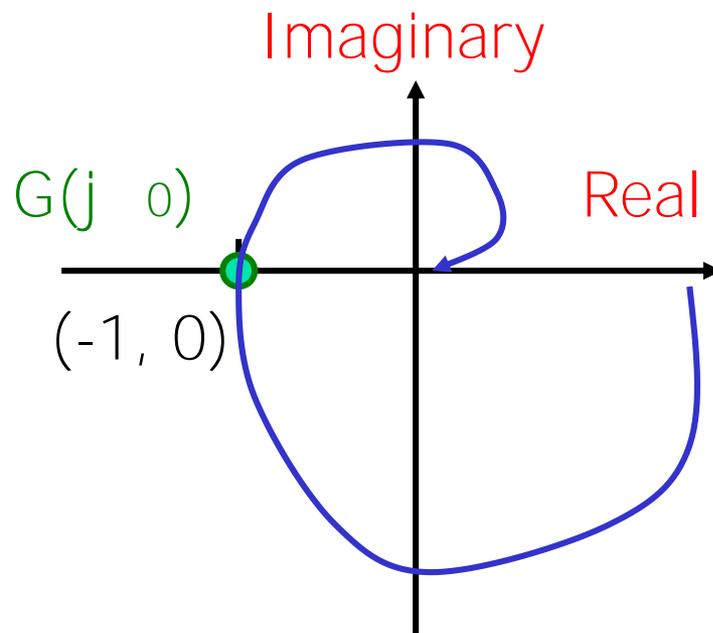


ベクトル線図による安定判別(2)

ある周波数 $\omega = 0$ で $\angle G(j\omega) = -\pi$ のとき
 $|G(j\omega)| = 1$ の場合、
フィードバックシステムは安定限界である。

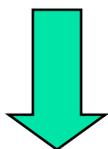


$G(j\omega)$ のベクトル線図が
 $(-1, 0)$ 上を通るとき
フィードバックシステムは
安定限界。

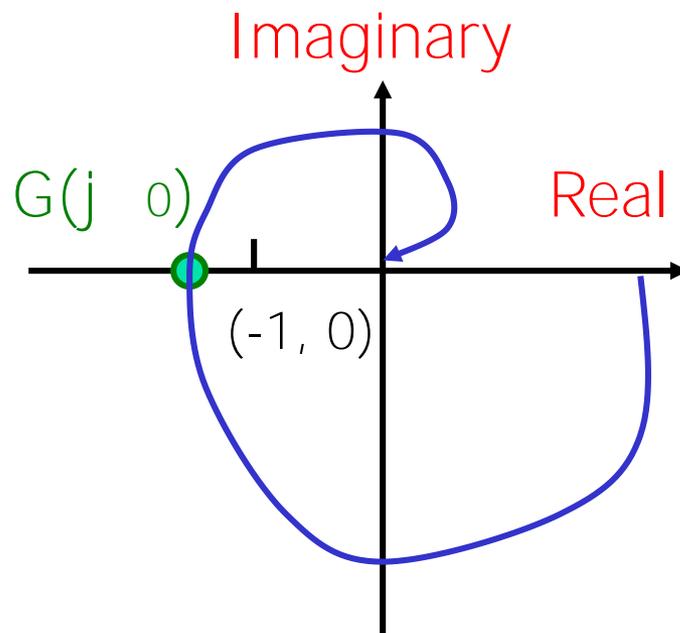


ベクトル線図による安定判別(3)

ある周波数 $\omega = 0$ で $\angle G(j\omega) = -\pi$ のとき
 $|G(j\omega)| > 1$ の場合、
フィードバックシステムは不安定である。



$G(j\omega)$ のベクトル線図が
 $(-1, 0)$ の外側を通るとき
フィードバックシステムは
不安定。

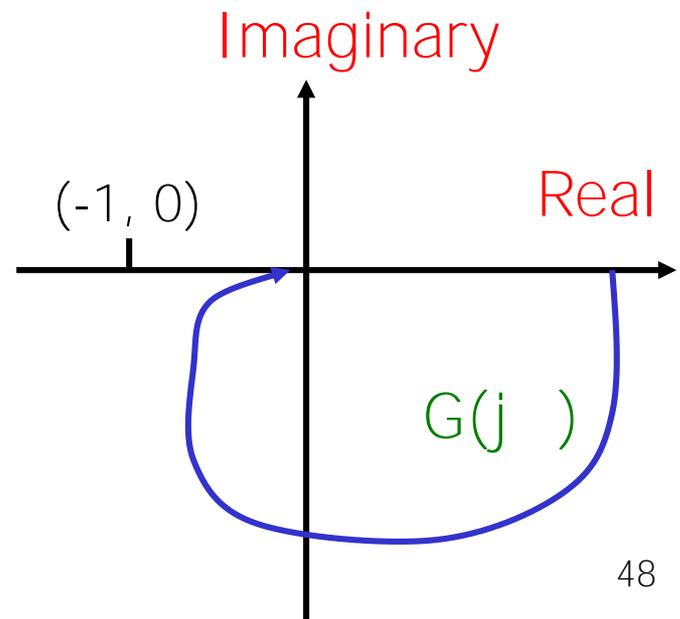
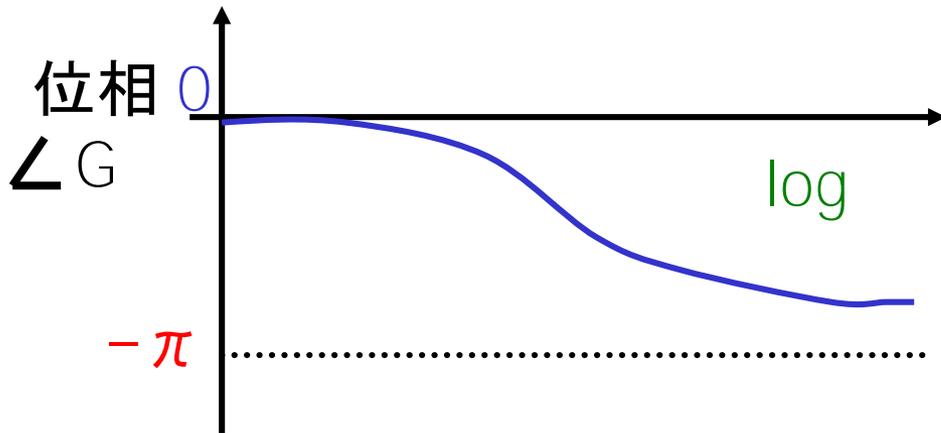


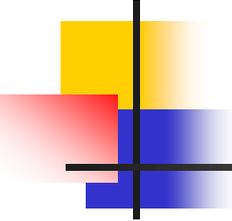
位相遅れが π までにならないとき

$\angle G(j\omega) = -\pi$ なる ω が存在しないとき
フィードバックシステムは安定である。

例: $G(j\omega) = \frac{K}{1+j\omega T}$ のとき

例: 位相線図、ベクトル線図が
次のような形をしているとき



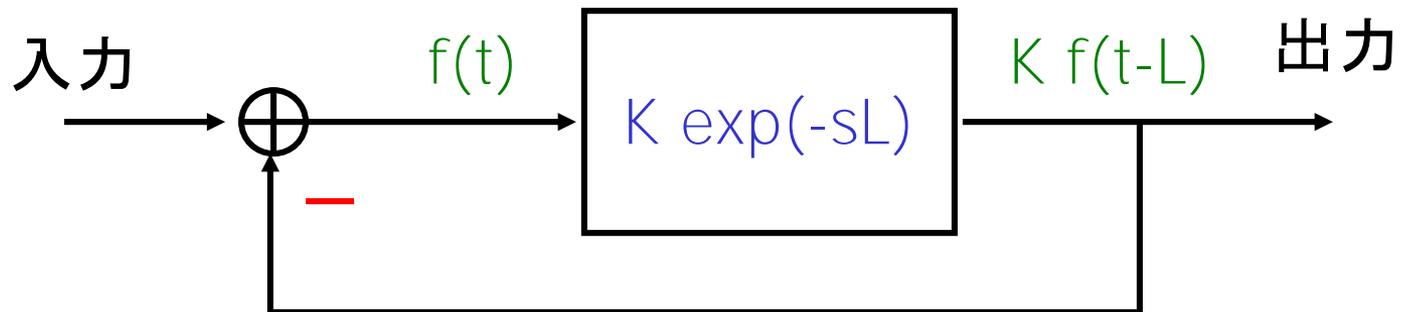


制御工学

- 安定度： 安定なシステムをフィードバックをかけて安定になった場合、
「どの程度安定性の余裕があるか」
ゲイン余裕・位相余裕
ベクトル線図、ボーデ線図を用いる。

Nyquist の安定判別 例題

$G(s) = K \exp(-sL)$, $L > 0$ のとき、下図のフィードバックシステムが安定になるための $K (> 0)$ の条件を求めよ。



注: $G(s)$ が s の有理多項式でない場合
R-H法は適用不可

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K \exp(-sL)}{1+K \exp(-sL)}$$

$K \exp(-j \omega L)$ のボーデ線図

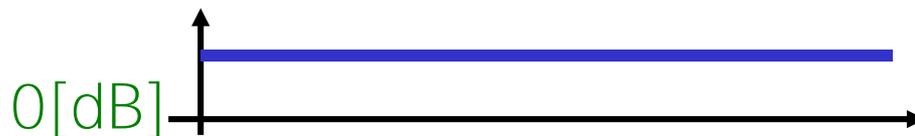
ゲイン
 $20 \log |G|$
[dB]



$K < 1$
(安定)

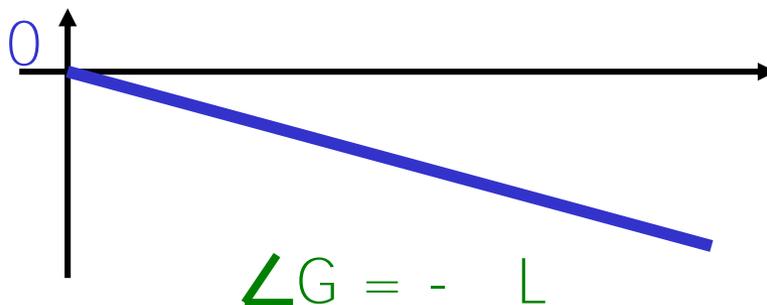


$K = 1$
(安定限界)



$K > 1$
(不安定)

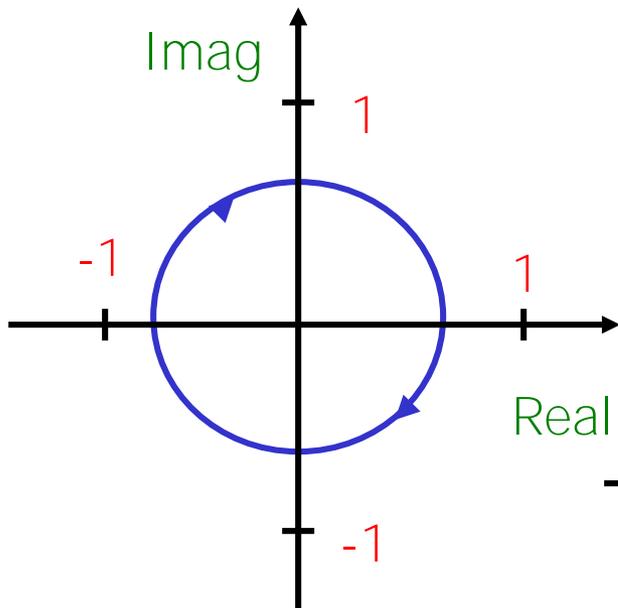
位相
 $\angle G$



線形位相
Linear Phase

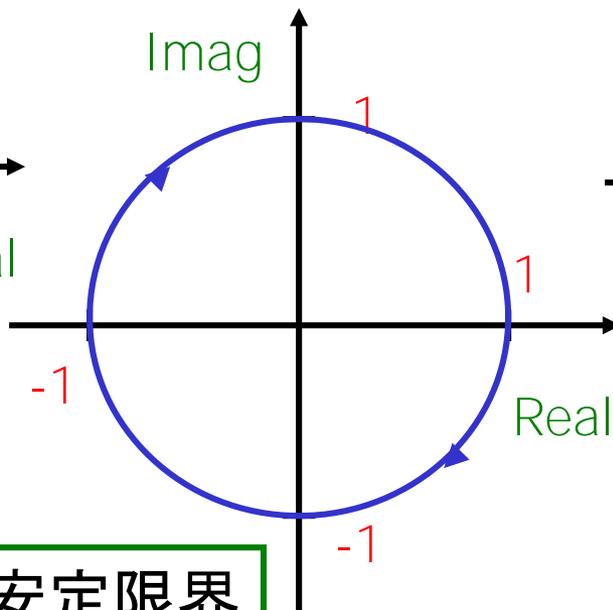
$K \exp(-jL)$ のベクトル線図

$K < 1$



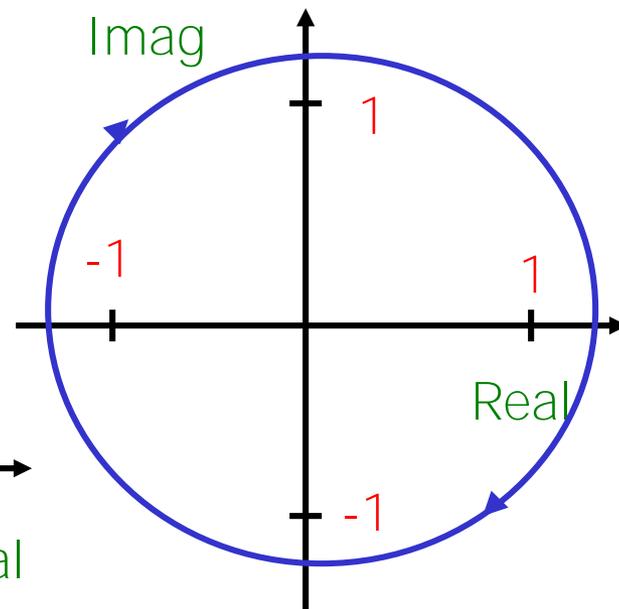
安定

$K = 1$



安定限界

$K > 1$



不安定

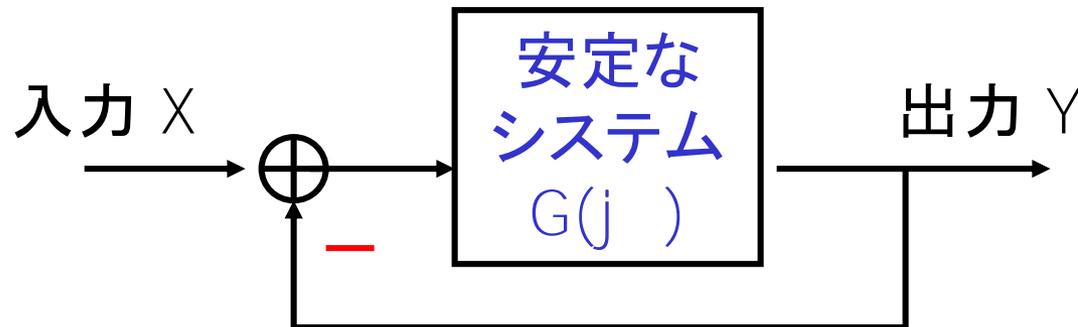
フィードバック・システムの安定度 (ゲイン余裕、位相余裕)

安定なシステム $G(j\omega)$ にフィードバックをかける。

ある周波数 $\omega = \omega_0$ で $\angle G(j\omega_0) = -\pi$ のとき

$|G(j\omega_0)| < 1$ の場合、

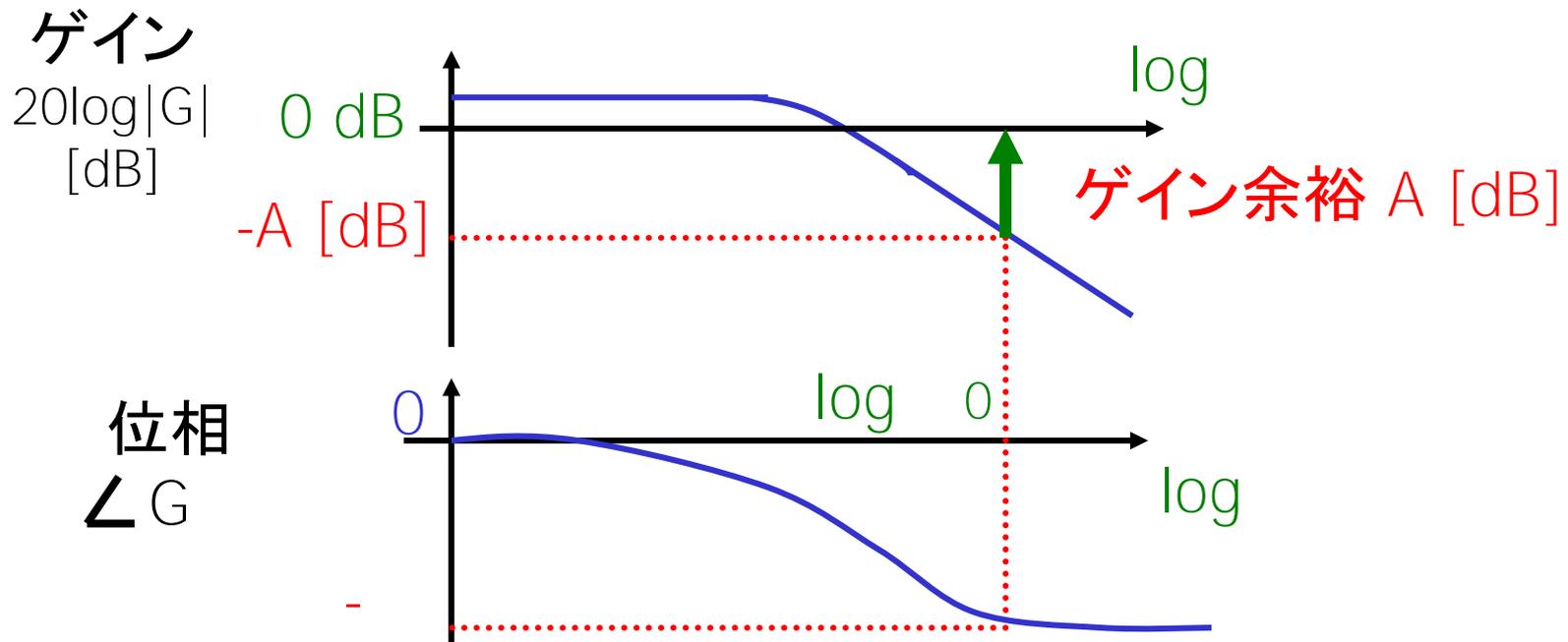
フィードバックシステムは安定である。



システム全体は安定の場合、「どの程度」安定か？

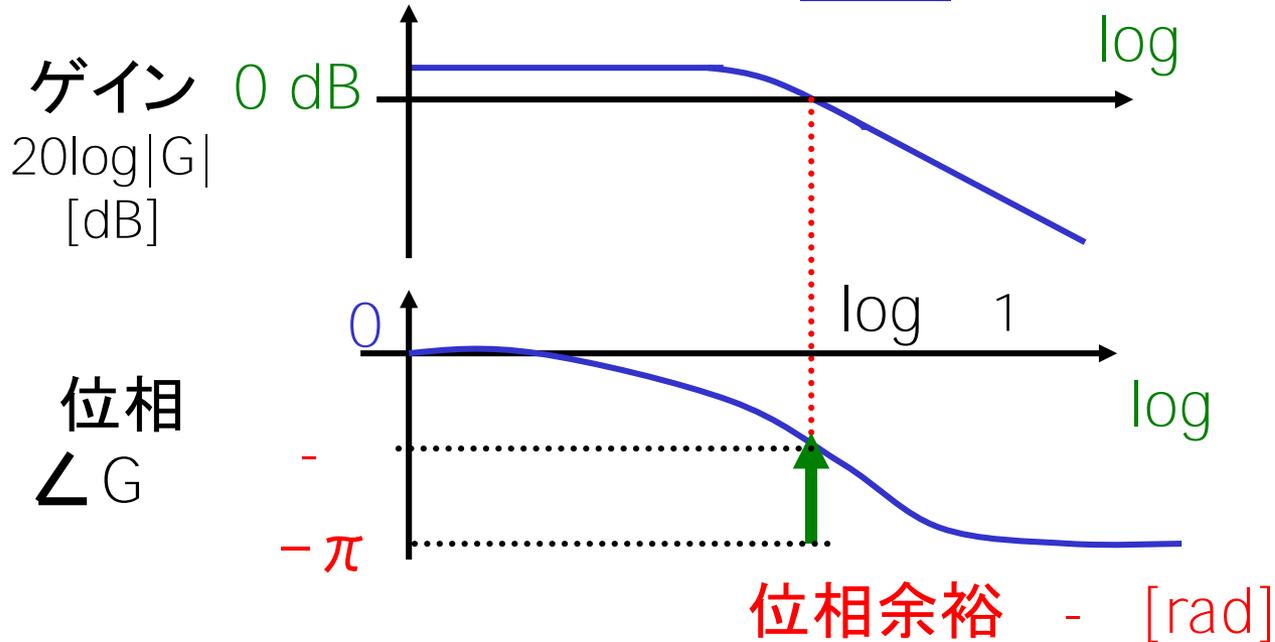
ゲイン余裕 (Gain Margin) とボーデ線図

ある周波数 ω_c で $\angle G(j\omega_c) = -\pi$ のとき
 $20 \log |G(j\omega_c)| < 0 \text{ dB}$ の場合、
フィードバックシステムは安定である。



位相余裕 (Phase Margin) とボーデ線図

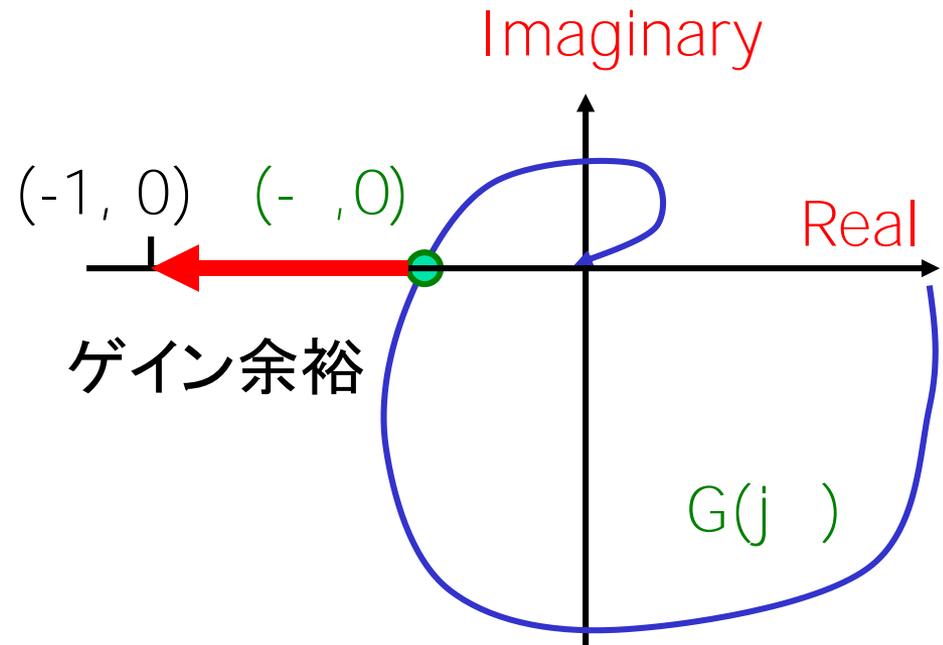
ある周波数 $\omega = \omega_1$ で $20 \log |G(j\omega)| = 0 \text{ dB}$
 $\angle G(j\omega) > -\pi$ のとき
フィードバックシステムは安定である。



ゲイン余裕 (Gain Margin) と ベクトル線図

$G(j\omega)$ のベクトル線図が $(-1, 0)$ の内側を通るとき
フィードバックシステムは安定。

$$\text{ゲイン余裕} = -20 \log \left[\frac{1}{|G(j\omega)|} \right] \text{ [dB]}$$

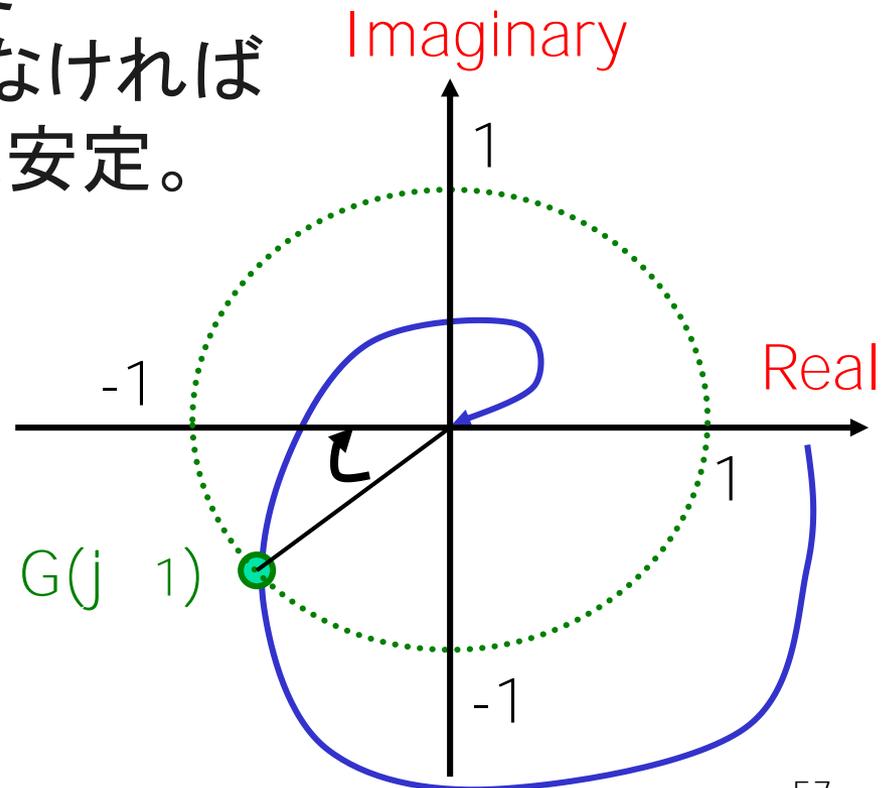


位相余裕 (Phase Margin) と ベクトル線図

$G(j\omega)$ のベクトル線図で
単位円上を交差する点で
位相が $-\pi$ まで回っていないならば
フィードバックシステムは安定。

位相余裕

$$= \pi + \angle G(j\omega_1)$$



アレクサンドル・リアプノフ

Aleksandr Lyapunov 1857-1918



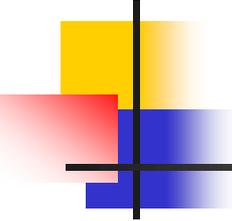
ロシアの数学者, 物理学者 (帝政ロシア時代)

1892年 博士論文"運動の安定性の一般問題" モスクワ大学

非線形システムの安定性 → リアプノフ関数

数学において、力学系や自励系を成す常微分方程式系における不動点の安定性を証明のために使用。

安定性理論や制御理論で重要な数学的ツール



「計測」と「制御」は双対の関係

「計測なくして制御なし」

計測技術と制御技術は表裏一体の関係

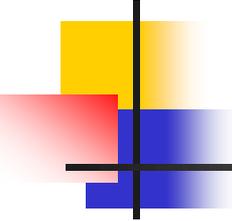
カルマンフィルタ(観測、計測)

最適制御(制御)

数式上双対の関係が示されている

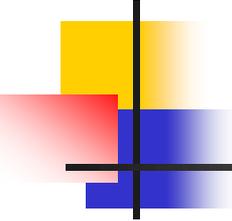
“You can't control what you can't measure.”

(Tom DeMarco)



付録

フーリエ変換とラプラス変換



Fourier 変換の限界

$$G(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-j\omega t) dt$$

は安定なシステム、すなわち

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0$$

の場合にのみ適用できる。

上記条件を満たさないときはFourier 積分の値が存在しない。

Joseph Fourier

1768-1830



ナポレオン時代のフランス人
エジプト遠征につきそう。
エジプト学の研究者でもある。
政治的にも活躍。

Laplace の後を継いで大学教授になる。

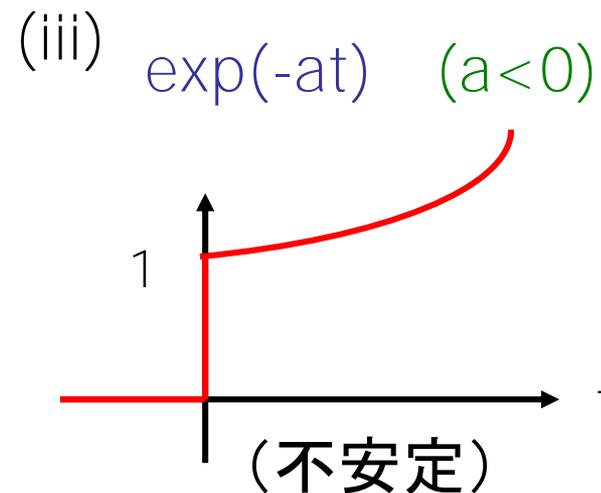
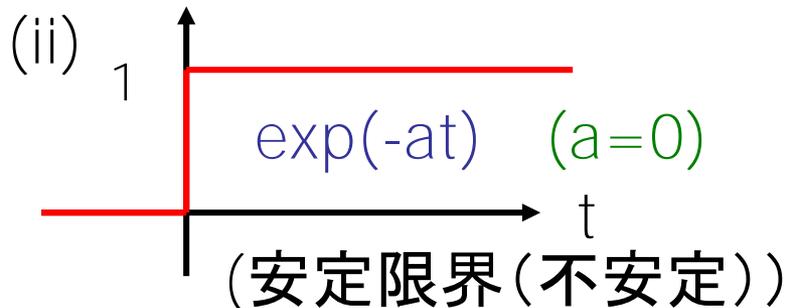
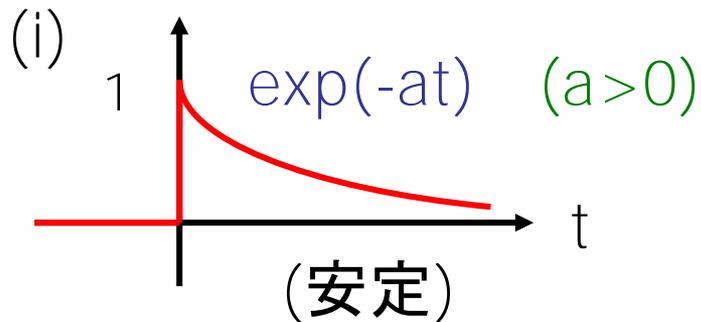
Fourier 級数展開の理論は最初はフランス科学界
に受け入れられなかった。

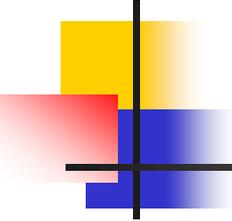
Joseph Fourier upset the French Academy in 1807.

線形システムのインパルス応答

$\exp(-at)$ は重要な関数

インパルス応答 $g(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \exp(-at) & (t > 0) \end{cases}$





$$g(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \exp(-at) & (t > 0) \end{cases}$$

のフーリエ積分

$$G(j\omega) = \int_0^{\infty} \exp(-at) \exp(-j\omega t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-(a + j\omega)t) dt$$

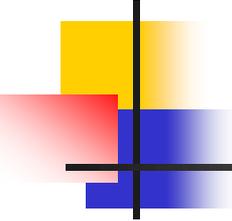
$$= \frac{-1}{j\omega + a} [\exp(-(a + j\omega)t)]_0^{\infty} = \frac{1}{a + j\omega} [1 - \exp(-(a + j\omega)\infty)]$$

(注) $|\exp(-(a + j\omega)t)| = |\exp(-at)| |\exp(-j\omega t)|$

$$0 \quad (a > 0)$$

$$= |\exp(-at)| \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 1 \quad (a = 0)$$

$$\infty \quad (a < 0)$$



$$g(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \exp(-at) & (t > 0) \end{cases}$$

のフーリエ積分

- (i) $a > 0$ のとき $G(j\omega) = 1/(a + j\omega)$
- (ii) $a = 0$ のとき $G(j\omega)$ の値は存在しない。
- (iii) $a < 0$ のとき $G(j\omega)$ の値は存在しない。

(ii)の補足: $a = 0$ のとき

$$G(j\omega) = \int_0^{\infty} \exp(-j\omega t) dt = \int_0^{\infty} [\cos(\omega t) - j \sin(\omega t)] dt$$

$$= \frac{1}{\omega} [\sin(\omega t) + j \cos(\omega t)]_0^{\infty}$$



有限確定の値が存在しない。

“定積分の値が存在する”の意味

- 歌手の吉幾三氏が

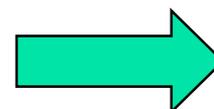
「オラが村には電気がない」



電気が物理的にない、電気がゼロだの意味。

- 数学者の高木貞治先生が

「この定積分には値がない」



積分に有限確定な値が存在しないとの意味。

- おなじ「ない」でも意味が異なる。

- 定積分の値が存在する。



その定積分に有限確定な値が存在する。

高木貞治 (たかぎ ていじ)

1875 - 1960

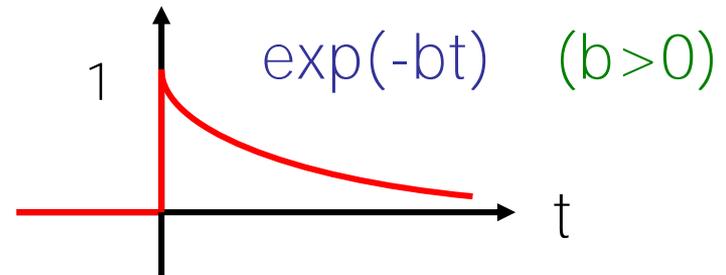
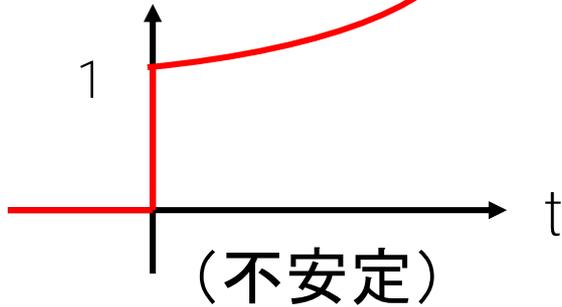


日本の数学者、東京帝国大学教授。
帝国大学理科大学(現在の東京大学理学部)数学科へ。
卒業後にドイツへ3年間留学, ヒルベルトに師事。
代数的整数論の研究では類体論を確立。
クロネッカーの青春の夢を解決。
ヒルベルトの23の問題のうち、第9問題と第12問題を解決。
『解析概論』『初等整数論講義』『代数的整数論』など
多くの数学教科書。

『解析概論』は私も学生時代に読みました。

Laplace変換の導入

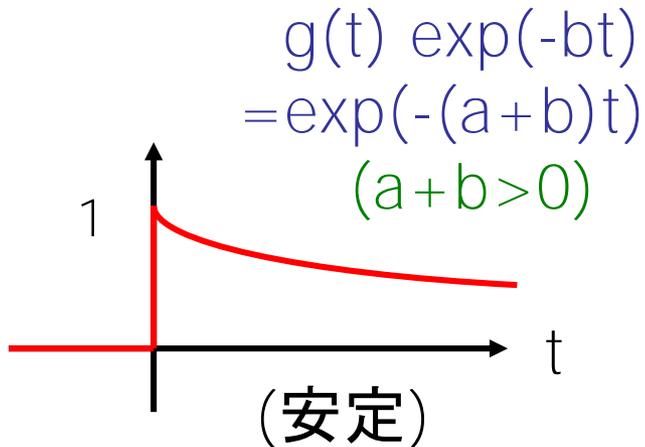
$$g(t) = \exp(-at) \quad (a < 0)$$



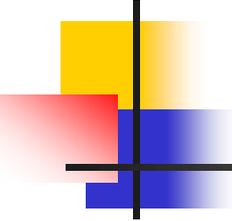
$g(t)$: 不安定

$g(t) \exp(-bt)$: 安定

$g(t) \exp(-bt)$ に
Fourier 変換を行う。



↓
Laplace変換



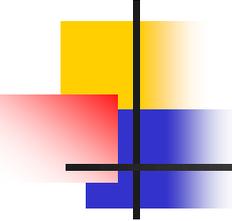
ラプラス変換の定義

$$G(b + j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-bt) \exp(-j\omega t) dt$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-(b + j\omega)t) dt$$

$$G(s) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-st) dt$$

ここで
 $s = b + j$



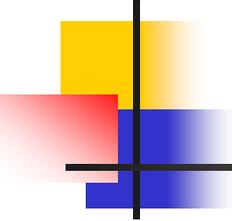
逆ラプラス変換の定義

$$g(t) \exp(-bt) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(b + j\omega) \exp(j\omega t) d\omega$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(b + j\omega) \exp((b + j\omega)t) d\omega$$

$$g(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{b-j\infty}^{b+j\infty} G(s) \exp(st) ds$$

ここで
 $s = b + j$



周波数伝達関数と伝達関数(1)

安定なシステムのインパルス応答 $g(t)$

周波数伝達関数 $G(j\omega)$

$$G(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-j\omega t) dt$$

周波数伝達関数 $G(j\omega)$ の $|G(j\omega)|$, $\angle G(j\omega)$ は
物理的な意味(周波数応答)をもつ。

周波数伝達関数と伝達関数(2)

安定または不安定なシステムの

インパルス応答 $g(t)$

伝達関数 $G(s)$

$$G(s) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-st) dt$$

$G(s)$ は周波数伝達関数 $G(j\omega)$ のような物理的意味はもたない。
ではなぜ $G(s)$ を考えるのか。

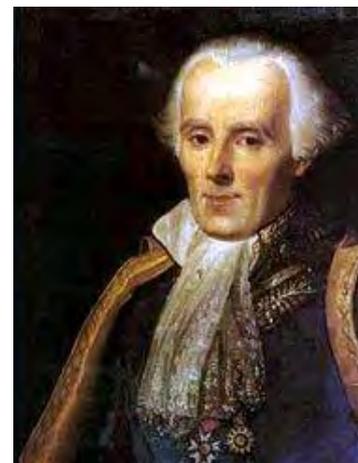
ピエールシモン・ラプラス

Pierre-Simon Laplace 1749-1827

フランスの数学者

「天体力学」「確率論の解析理論」の名著

ラプラス変換の考案者



決定論者。これから起きるすべての現象は、
これまでに起きたことに起因する。

ある特定の時間の宇宙のすべての粒子の運動状態
が分かれば、これから起きる現象は計算できる。



後に量子力学により否定される。

オリヴァー・ヘヴィサイド

Oliver Heaviside 1850 - 1925



- イギリスの電気技師、物理学者、数学者
- 電気回路での複素数の導入
インピーダンスの概念の導入、
「ヘヴィサイドの演算子法」の開発
- インダクタンスやコンダクタンスなど、
回路理論用語のいくつかを提唱
- ベクトル解析とベクトル演算を発明
- マクスウェル方程式： 当時は20の式から構成
現在の4つのベクトル形式の式に直す

Analysis and Design of Operational Amplifier Stability Based on Routh-Hurwitz Method

○王建龍

Gopal Adhikari 小林春夫 築地伸和 平野繭 栗原圭汰

群馬大学大学院 理工学府電子情報部門

長浜顕仁 野田一平 吉井宏治

リコー電子デバイス(株)



Contents

- Research Objective & Background
- Stability Criteria
 - Nyquist Criterion and Bode Plot
 - Routh-Hurwitz Criterion
- Proposed Method
 - Ex.1: Two-stage amplifier with C compensation
 - Ex.2: Two-stage amplifier with C, R compensation
 - Ex.3: Three-stage amplifier with C compensation
- Discussion & Conclusion

Contents

- Research Objective & Background
- Stability Criteria
 - Nyquist Criterion and Bode Plot
 - Routh-Hurwitz Criterion
- Proposed Method
 - Ex.1: Two-stage amplifier with C compensation
 - Ex.2: Two-stage amplifier with C, R compensation
 - Ex.3: Three-stage amplifier with C compensation
- Discussion & Conclusion

Research Background (Stability Theory)

● Electronic Circuit Design Field

- Bode plot (>90% frequently used)
- Nyquist plot (源代裕治、電子回路研究会 2015年7月)

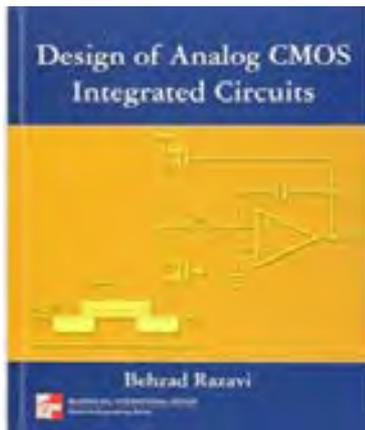
● Control Theory Field

- Bode plot
- Nyquist plot
- Nicholas plot
- Routh-Hurwitz stability criterion
 - ➔ Very popular in control theory field
but rarely seen in electronic circuit books/papers
- Lyapunov function method

:

Electronic Circuit Text Book

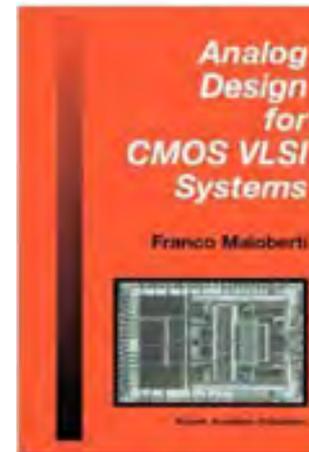
We were **NOT** able to find out any electronic circuit text book which describes **Routh-Hurwitz** method for operational amplifier stability analysis and design !



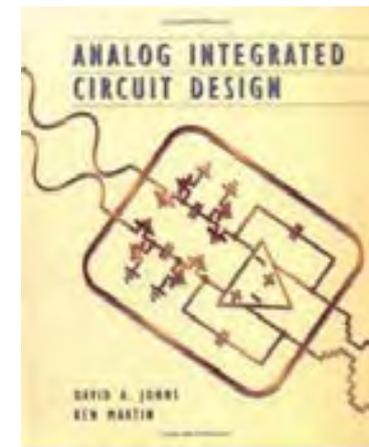
Razavi



Gray



Maloberti

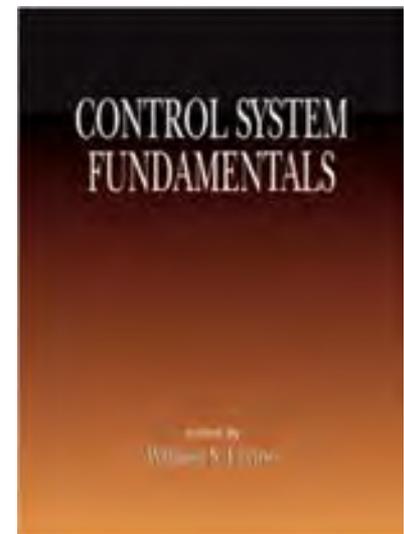
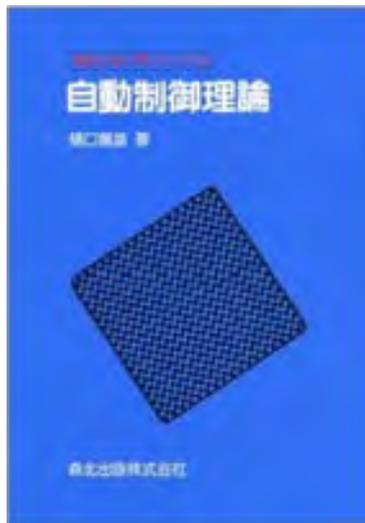


Martin

None of the above describes Routh-Hurwitz.
Only **Bode plot** is used.

Control Theory Text Book

Most of control theory text books describe **Routh-Hurwitz** method for system stability analysis and design !



Research Objective

Our proposal

For
Analysis and design of operational amplifier stability

Use
Routh-Hurwitz stability criterion

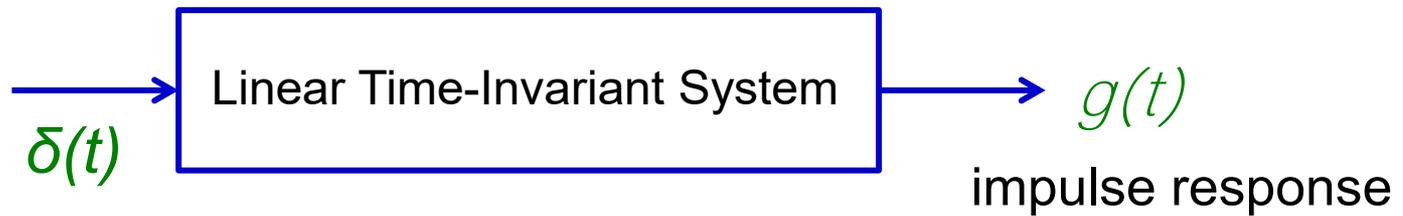


We can obtain
Explicit stability condition for circuit parameters
(which can NOT be obtained only with Bode plot).

Contents

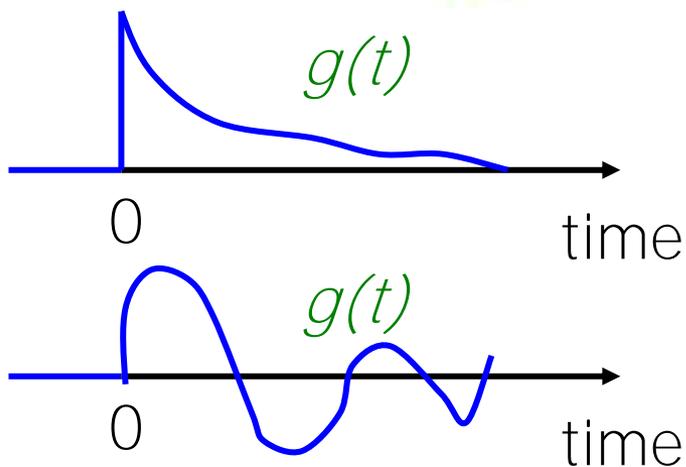
- Research Objective & Background
- **Stability Criteria**
 - Nyquist Criterion and Bode Plot
 - Routh-Hurwitz Criterion
- Proposed Method
 - Ex.1: Two-stage amplifier with C compensation
 - Ex.2: Two-stage amplifier with C, R compensation
 - Ex.3: Three-stage amplifier with C compensation
- Discussion & Conclusion

Stability of Linear Time-Invariant System

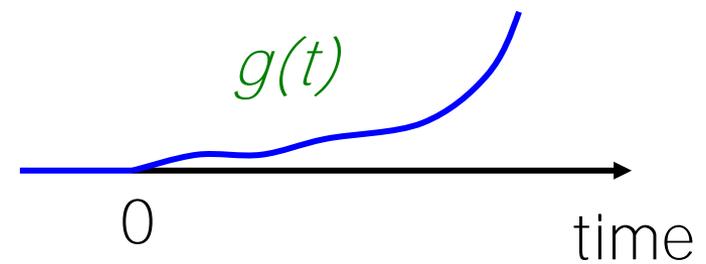


System is stable $\iff \lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0$

Stable



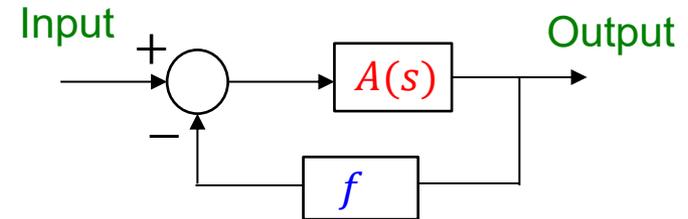
unstable



Stability Criteria of Linear Feedback System

- Problem:

Feedback system is stable or not ?



- Open-loop frequency characteristics of $fA(j\omega)$

➔ Nyquist stability criterion

Bode plot

Nyquist plot

Nicholas plot

- Closed-loop transfer function $\frac{A(s)}{1 + fA(s)}$

➔ Routh-Hurwitz stability criterion

Contents

- Research Objective & Background

- Stability Criteria

 - Nyquist Criterion and Bode Plot

 - Routh-Hurwitz Criterion



Harry Nyquist
1889-1976 (Sweden)



Hendrik Wade Bode
1905-1982 (蘭)

- Proposed

Ex.1: T amplifier with ation

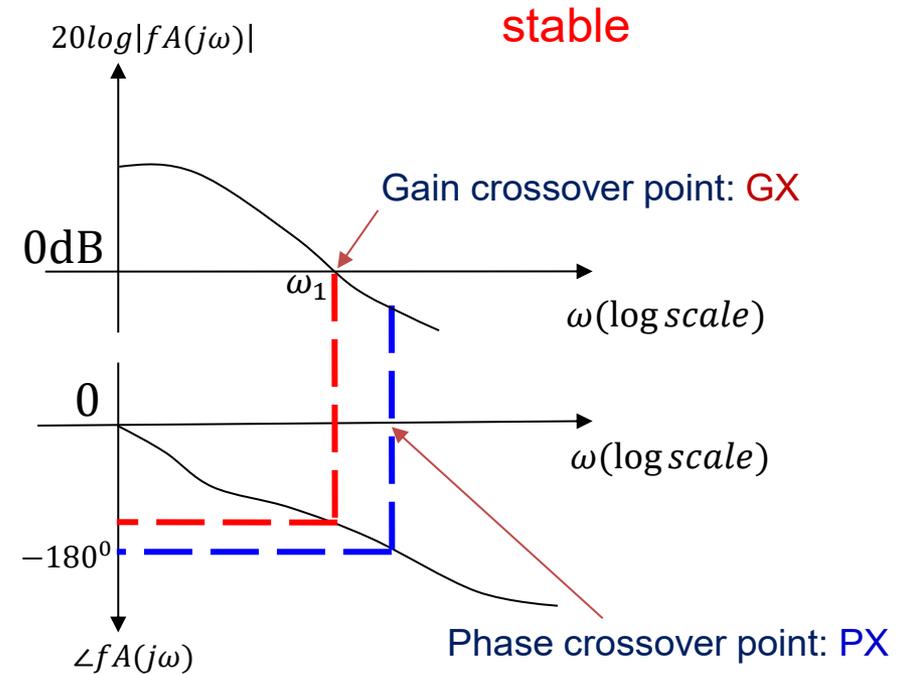
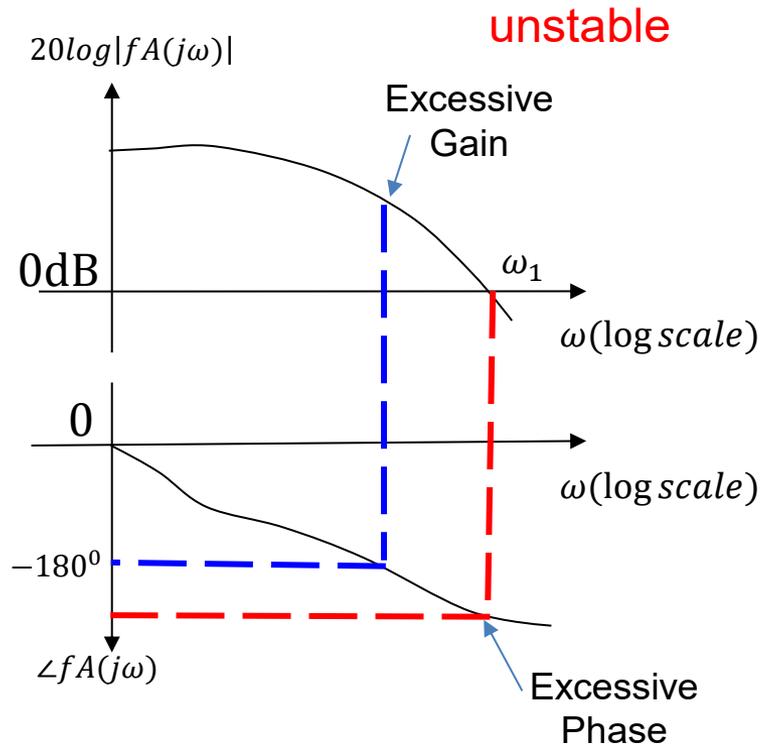
Ex.2: T amplifier with nsation

Ex.3: T amplifier w sation

- Discussion & Conclusion

Bode Plot (Gain & Phase vs Freq.)

Open-loop frequency characteristics of $fA(j\omega)$

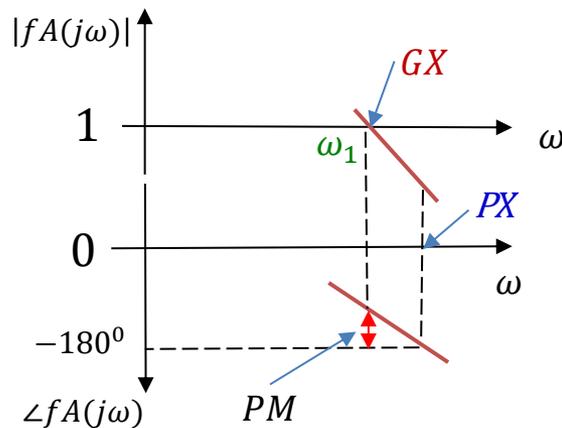


Stable system \Rightarrow gain crossover GX before phase crossover PX.

Used for frequency characteristics, stability check, gain & phase margins

Phase Margin from Bode Plot

GX precedes PX \Rightarrow feedback system is stable.



Greater spacing between GX and PX



More stable

ω_1 : gain crossover frequency

$$\text{Phase margin : } PM = 180^\circ + \angle fA(\omega = \omega_1)$$

Bode plot is useful,
but it does NOT show explicit stability conditions of circuit parameters.

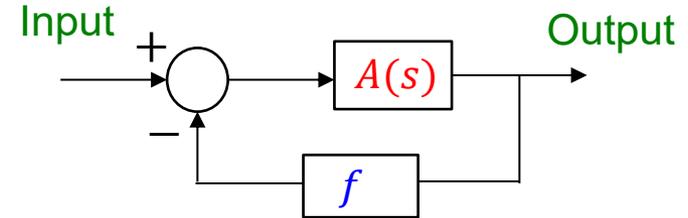
Contents

- Research Objective & Background
- **Stability Criteria**
 - Nyquist Criterion and Bode Plot
 - **Routh-Hurwitz Criterion**
- Proposed Method
 - Ex.1: Two-stage amplifier with C compensation
 - Ex.2: Two-stage amplifier with C, R compensation
 - Ex.3: Three-stage amplifier with C compensation
- Discussion & Conclusion

Transfer Function and Stability

- Transfer function of closed-loop system

$$G(s) = \frac{A(s)}{1 + fA(s)} = \frac{N(s)}{D(s)}$$



- Suppose

$$N(s) = b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0$$

$$D(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0$$



J. Maxwell



A. Stodola

- System is stable if and only if

Maxwell and Stodola found out !!

real parts of all the roots s_p of the following are **negative**:

Characteristic equation $D(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$

- To satisfy this, what are the conditions for $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$?

Routh and Hurwitz solved this problem independently !!

Routh and Hurwitz



Edward Routh
1831- 1907 (英)

1876

Routh test



Adolf Hurwitz
1859 - 1919 (独)

1895

Hurwitz matrix

Very different algorithms,
but later it was proved that both are the same results.



Discover Truth

Routh Stability Criterion

Characteristic equation:

$$D(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

Routh table

s^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	a_{n-6}	...
s^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	a_{n-7}	...
s^{n-2}	$b_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}}$	$b_2 = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}}$	b_3	b_4	...
s^{n-3}	$c_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1}$	$c_2 = \frac{b_1 a_{n-5} - a_{n-1} b_3}{b_1}$	c_3	c_4	...
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
s^0	a_0				

Sufficient and necessary condition:

(i) $a_i > 0$ for $i = 0, 1, \dots, n$

&

(ii) **All** values of Routh table's first columns are positive.

Mathematical test



Determine whether given polynomial has all roots in the left-half plane.

Contents

- Research Objective & Background
- Stability Criteria
 - Nyquist Criterion and Bode Plot
 - Routh-Hurwitz Criterion
- Proposed Method
 - Ex.1: Two-stage amplifier with C compensation**
 - Ex.2: Two-stage amplifier with C, R compensation
 - Ex.3: Three-stage amplifier with C compensation
- Discussion & Conclusion

Amplifier Circuit and Small Signal Model

Open-loop transfer function
from small signal model

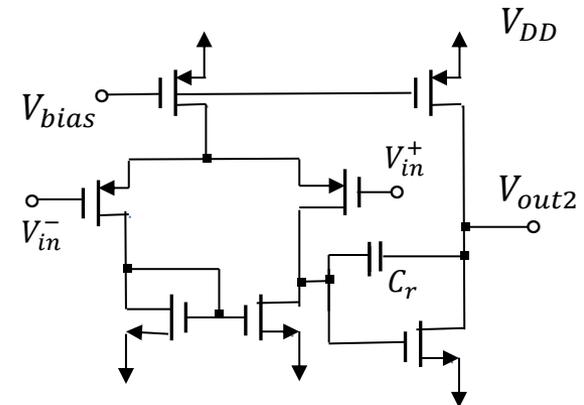
$$A(s) = \frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)} = A_0 \frac{1 + b_1 s}{1 + a_1 s + a_2 s^2}$$

$$b_1 = -\frac{C_r}{G_{m2}}$$

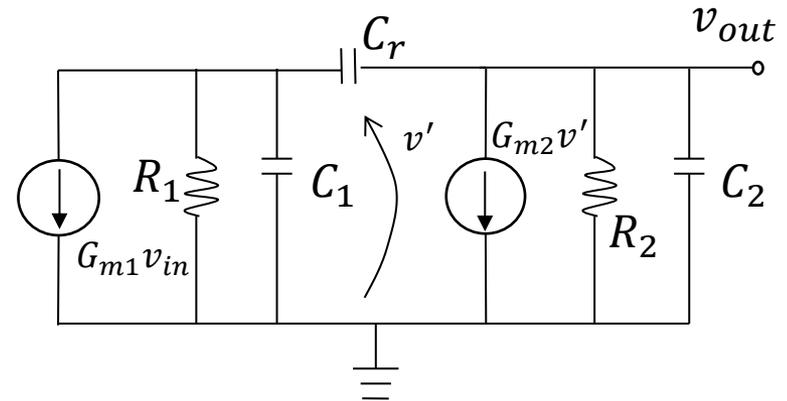
$$A_0 = G_{m1} G_{m2} R_1 R_2$$

$$a_2 = R_1 R_2 C_2 \left[C_1 + \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right) C_r \right]$$

$$a_1 = R_1 C_1 + R_2 C_2 + (R_1 + R_2 + R_1 G_{m2} R_2) C_r$$



Amplifier circuit

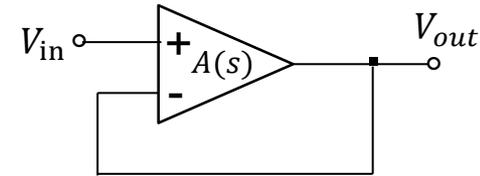


Small signal model

Feedback Configuration

Closed-loop transfer function:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{A(s)}{1 + fA(s)} = \frac{A_0(1 + b_1s)}{1 + fA_0 + (a_1 + fA_0b_1)s + a_2s^2}$$



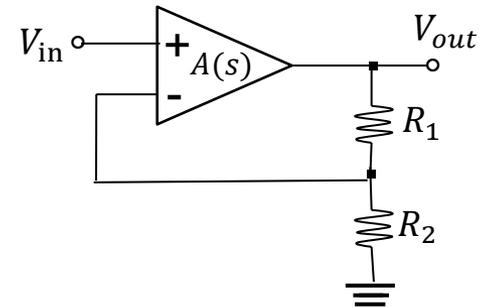
$$f = 1$$

Set parameter θ :

$$\theta = a_1 + fA_0b_1$$

Necessary and sufficient stability condition based on R-H criterion

➔ $\theta > 0$



$$f = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

➔ $R_1C_1 + R_2C_2 + (R_1 + R_2)C_r + (G_{m2} - fG_{m1})R_1R_2C_r > 0$

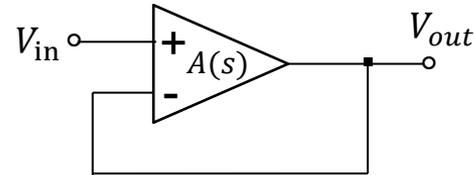
Explicit stability condition of parameters

Verification with SPICE Simulation

Calculate values of θ

Depict Bode plot

analysis



voltage follower configuration

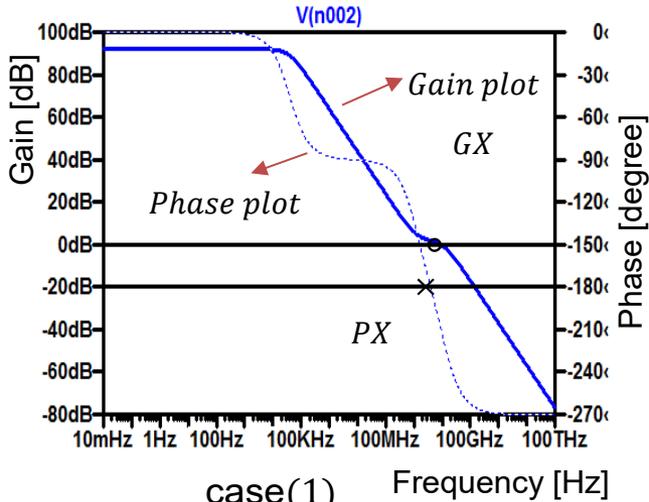
$$f = 1$$

case	Parameter values							R-H criterion	Bode plot
	R_1	C_1	R_2	C_2	G_{m1}	G_{m2}	C_r	θ	SPICE simulation
(1)	50k	10f	10k	0.1p	0.01	8m	1p	< 0	unstable
(2)	50k	1f	10k	10f	0.01	8m	0.1p	< 0	unstable
(3)	100k	100f	10k	1f	9m	4m	0.1p	< 0	unstable
(4)	100k	5f	90k	3f	8m	7.5m	0.9p	≈ 0	critical stable
(5)	100k	3f	50k	1f	8.5m	8m	0.5p	≈ 0	critical stable
(6)	1meg	6f	500k	0.5f	80u	70u	1f	≈ 0	critical stable
(7)	50k	10f	100	0.1p	0.01	8m	1p	> 0	stable
(8)	100k	5f	90k	3f	80u	70u	0.9p	> 0	stable
(9)	150k	6f	100k	1.5f	80u	70u	0.5p	> 0	stable

Consistency of Bode Plots and R-H Results

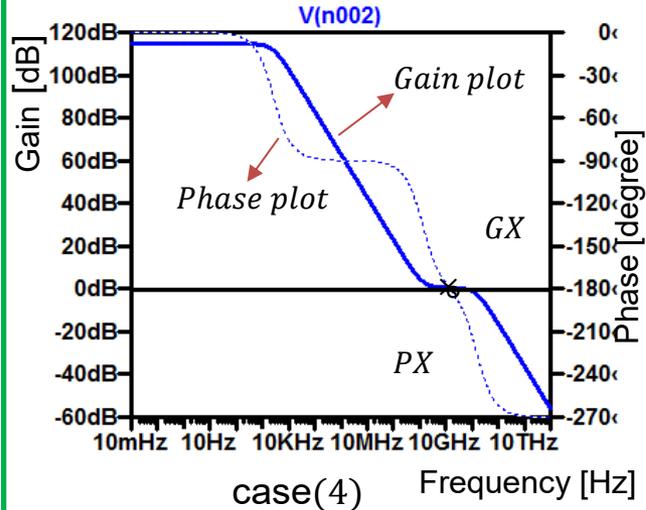
unstable

R-H: $\theta < 0$



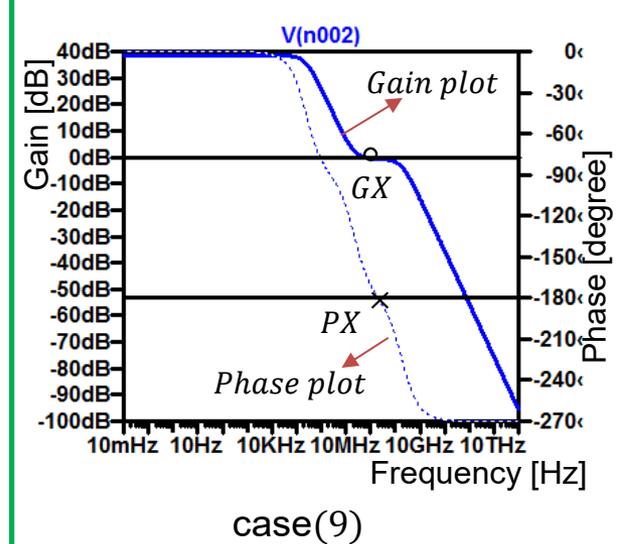
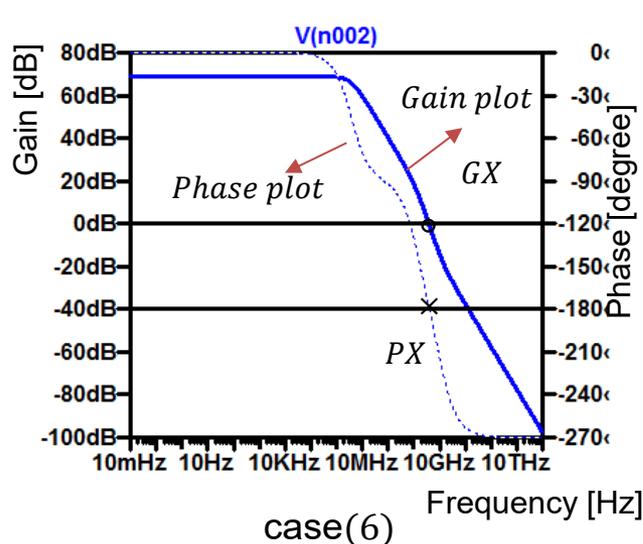
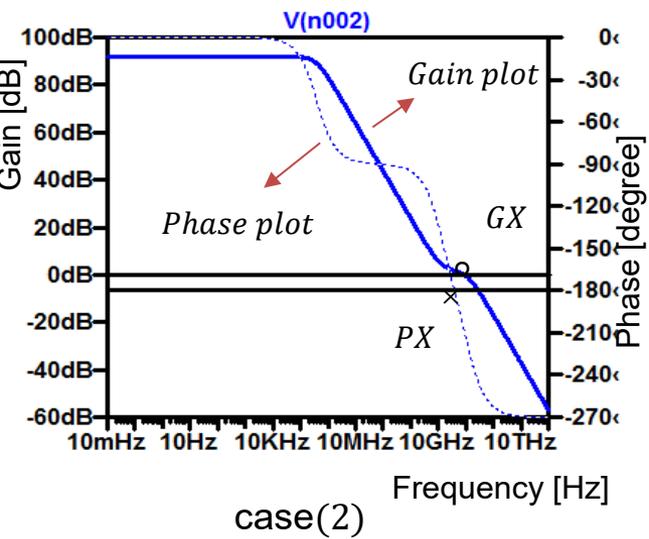
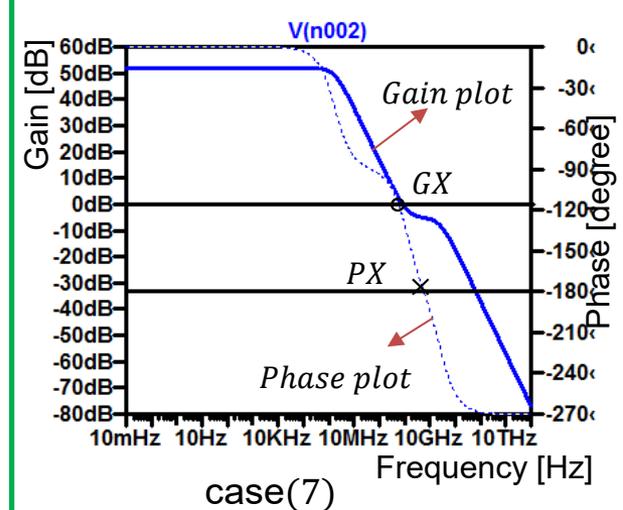
critical stable

R-H: $\theta \approx 0$

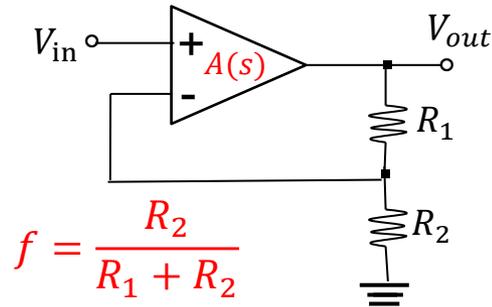


stable

R-H: $\theta > 0$



Consistency of Transient Analysis and R-H Results

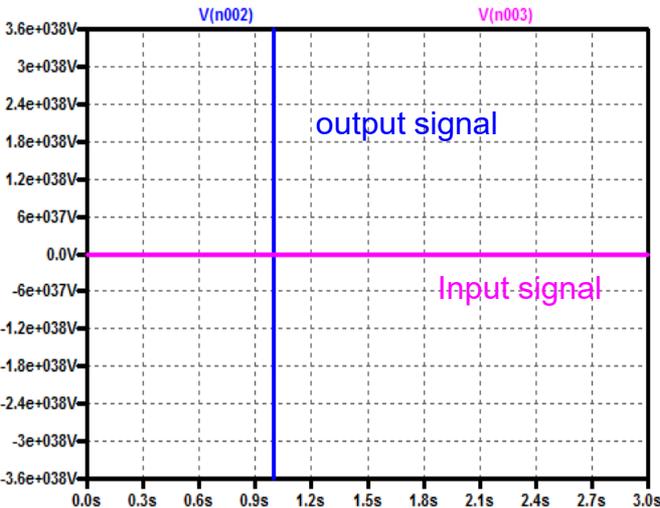


SPICE simulation

Step response with step input

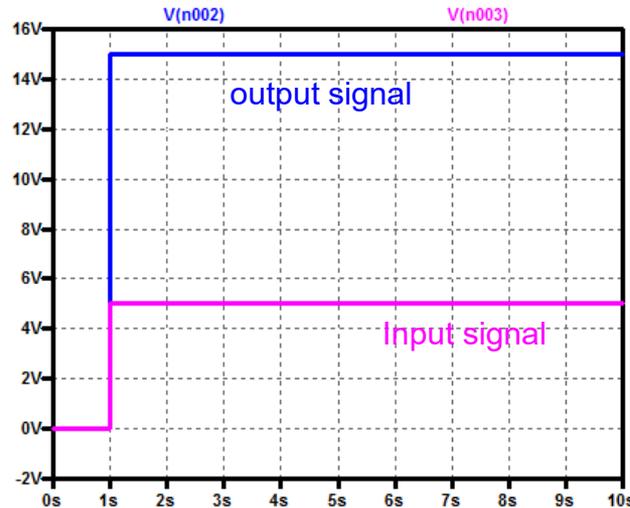
unstable

R-H: $\theta < 0$



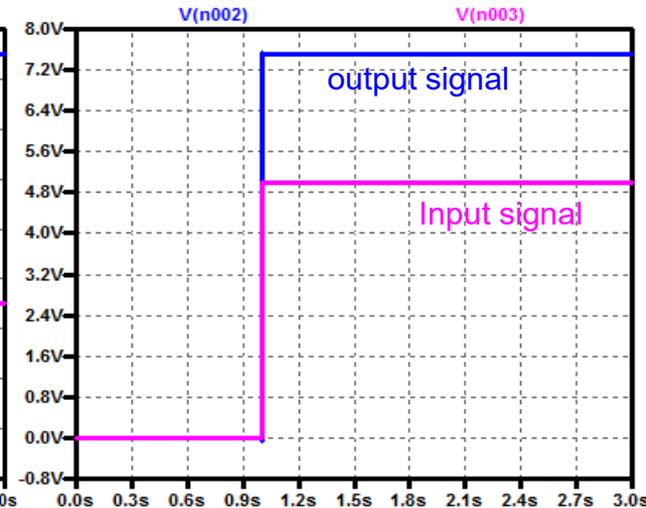
critical stable

R-H: $\theta \approx 0$



stable

R-H: $\theta > 0$



Contents

- Research Objective & Background
- Stability Criteria
 - Nyquist Criterion and Bode Plot
 - Routh-Hurwitz Criterion
- **Proposed Method**
 - Ex.1: Two-stage amplifier with C compensation
 - Ex.2: Two-stage amplifier with C, R compensation**
 - Ex.3: Three-stage amplifier with C compensation
- Discussion & Conclusion

Amplifier Circuit and Small Signal Model

Open-loop transfer function:

$$A(s) = \frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)} = A_0 \frac{1 + d_1 s}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$

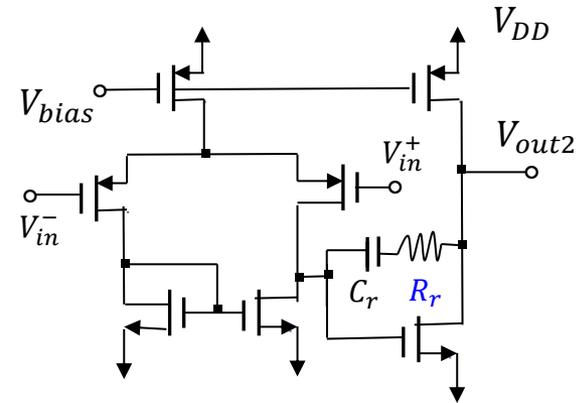
$$A_0 = G_{m1} G_{m2} R_1 R_2$$

$$d_1 = -\left(\frac{C_r}{G_{m2}} - R_r C_r\right)$$

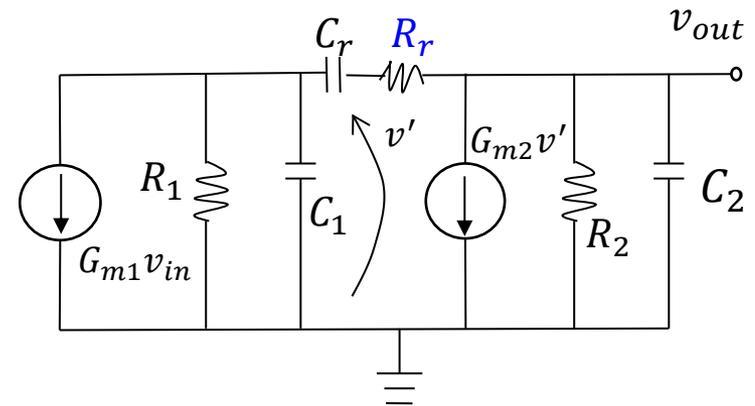
$$a_1 = R_1 C_1 + R_2 C_2 + (R_1 + R_2 + R_r + R_1 R_2 G_{m2}) C_r$$

$$a_2 = R_1 R_2 (C_2 C_r + C_1 C_2 + C_1 C_r) + R_r C_r (R_1 C_1 + R_2 C_2)$$

$$a_3 = R_1 R_2 R_r C_1 C_2 C_r$$



Amplifier circuit

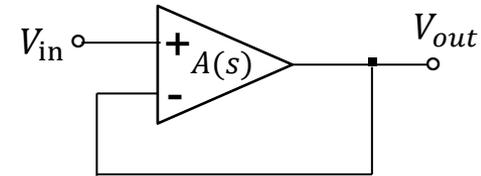


Small signal model

Feedback Configuration

Closed-loop transfer function:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{A(s)}{1 + fA(s)} = \frac{A_0(1 + d_1s)}{1 + fA_0 + (a_1 + fA_0d_1)s + a_2s^2 + a_3s^3}$$



$$f = 1$$

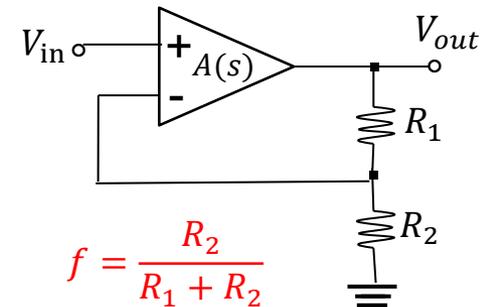
Set parameter φ :

$$\varphi = a_1 + fA_0d_1$$

$$= R_1C_1 + R_2C_2 + (R_1 + R_2 + R_r)C_r + (G_{m2} - fG_{m1} + fG_{m1}G_{m2}R_r)R_1R_2C_r$$

Necessary and sufficient stability condition based on R-H criterion

➔ $\varphi > 0$ & b_1 (parameter of Routh stable) > 0



$$f = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



$$R_1C_1 + R_2C_2 + (R_1 + R_2 + R_r)C_r + (G_{m2} - fG_{m1} + fG_{m1}G_{m2}R_r)R_1R_2C_r > 0$$

$$\frac{(a_1 + fA_0d_1)a_2 - a_3(1 + fA_0)}{a_2} > 0$$

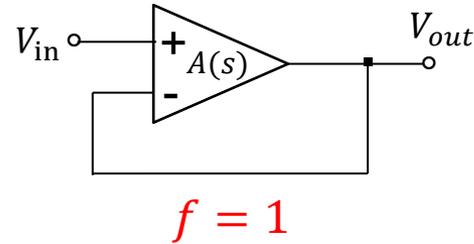
Explicit stability condition of parameters

Verification with SPICE Simulation

Calculate values of θ

Depict Bode plot

analysis



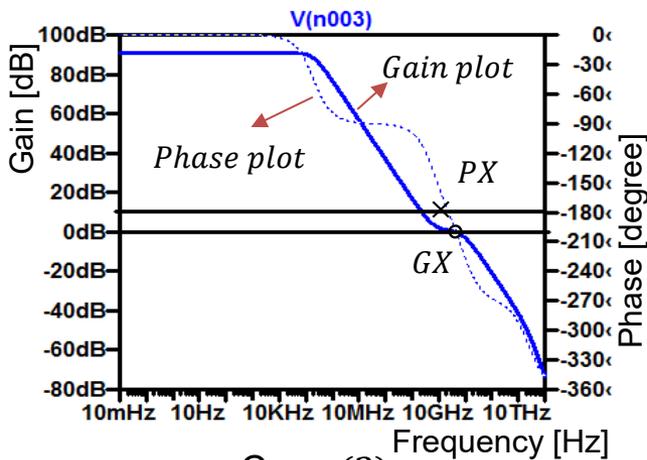
voltage follower configuration

case	Parameter values								R-H criterion		Bode plot
	R_1	C_1	R_2	C_2	G_{m1}	G_{m2}	R_r	C_r	φ	b_1	SPICE simulation
(1)	115k	5f	100k	80f	9m	5m	5	0.5p	< 0	< 0	unstable
(2)	50k	5f	10k	10f	9m	8m	2	0.2p	< 0	< 0	unstable
(3)	150k	5f	100k	10f	9m	8m	1	0.8p	< 0	< 0	unstable
(4)	110k	10f	10k	3f	0.01	8m	5	0.5f	≈ 0	≈ 0	critical
(5)	115k	10f	100k	3f	0.01	8m	5	0.5f	≈ 0	≈ 0	critical
(6)	150k	8f	100k	50f	7m	8m	10	0.6p	> 0	> 0	stable
(7)	100k	8f	80k	50f	6m	8m	5	0.6p	> 0	> 0	stable
(8)	200k	5f	150k	10f	5m	7m	2.5	0.6p	> 0	> 0	stable

Consistency of Bode Plots and R-H Results

unstable

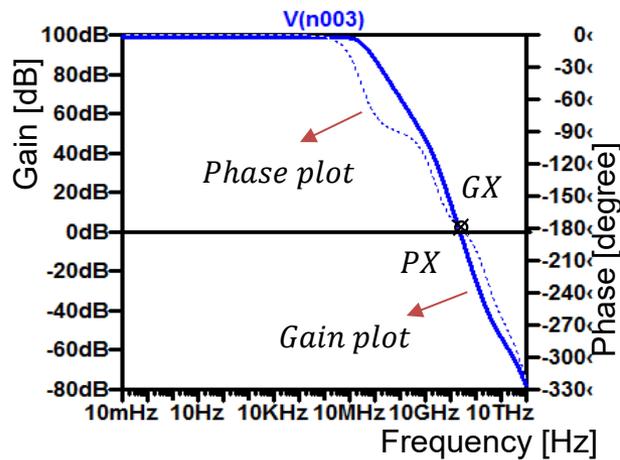
R-H: $\varphi < 0$



Case (2)

critical stable

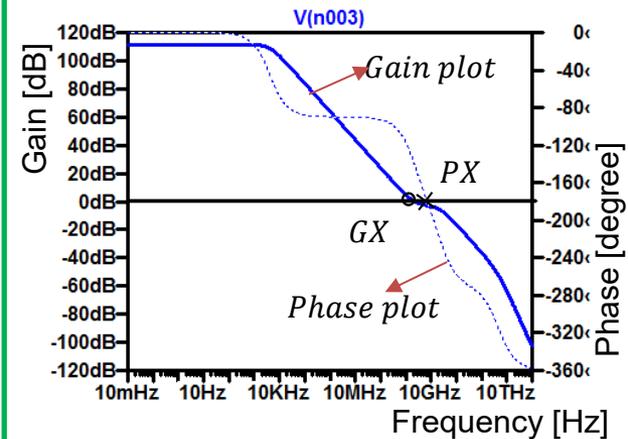
R-H: $\varphi \approx 0$



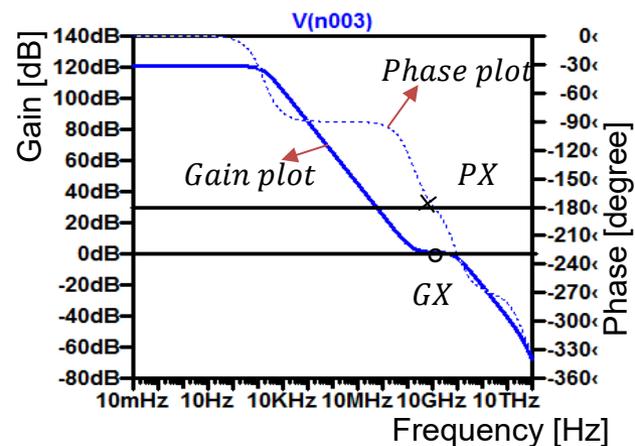
Case (4)

stable

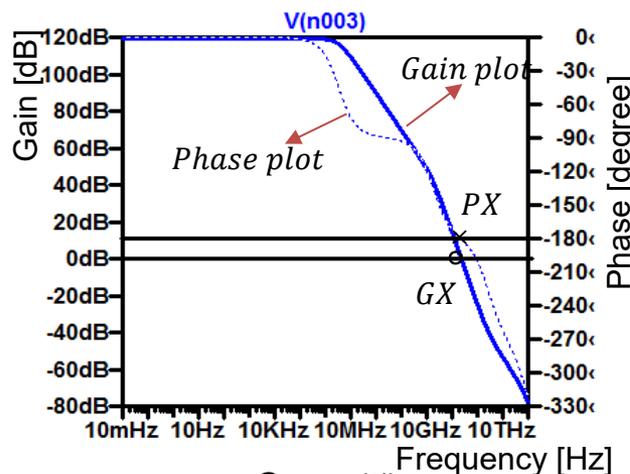
R-H: $\varphi > 0$



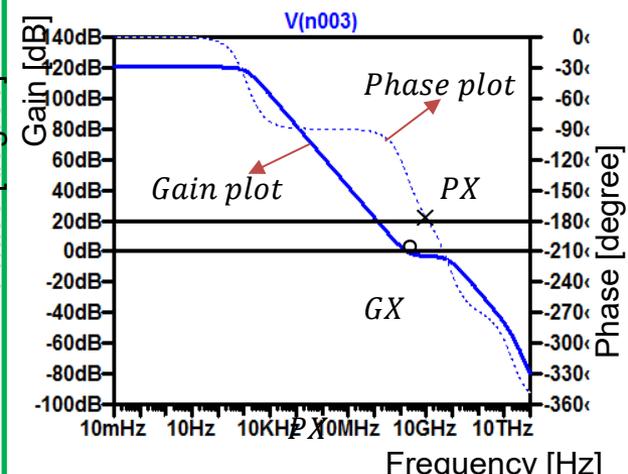
Case (7)



Case (3)



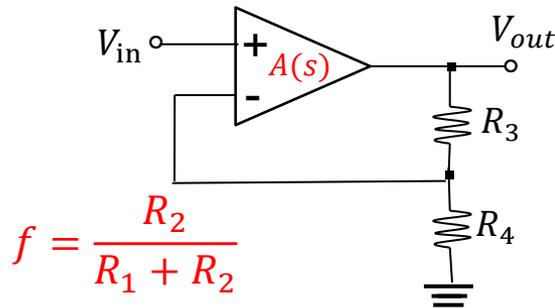
Case (5)



Case (8)

Consistency of Transient Analysis and R-H Results

Linear feedback system:



$$f = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

SPICE simulation

Step response with step input

unstable

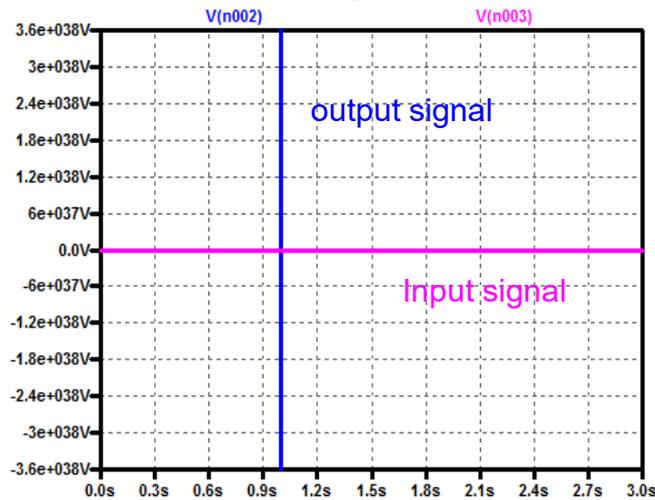
R-H: $\varphi < 0$

critical stable

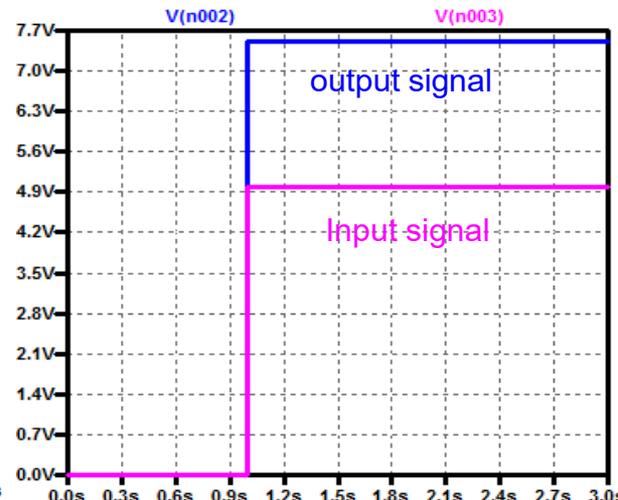
R-H: $\varphi \approx 0$

stable

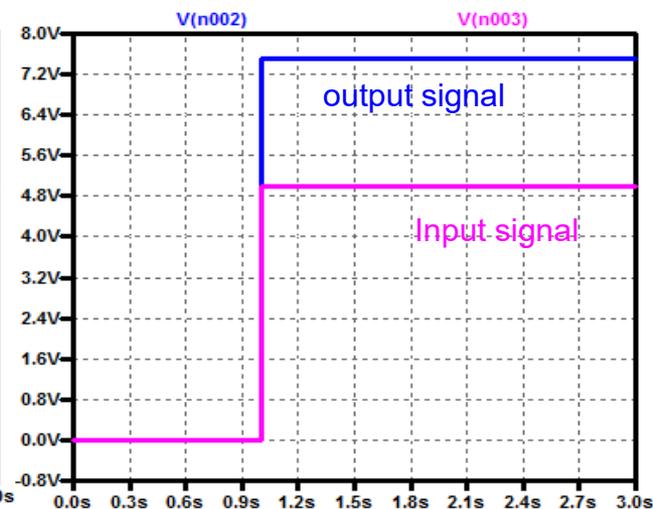
R-H: $\varphi > 0$



Case (1)



Case (5)

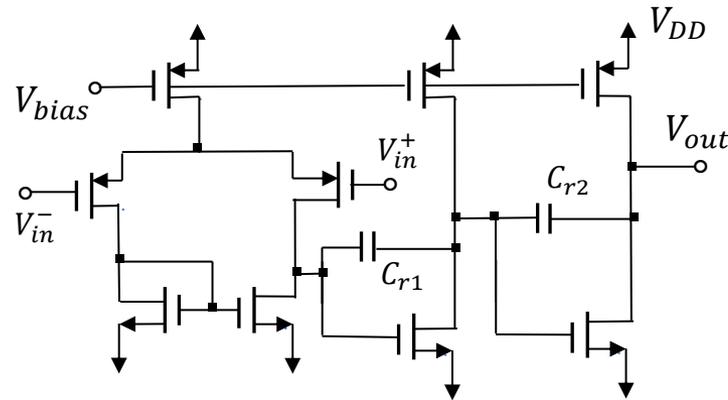


Case (8)

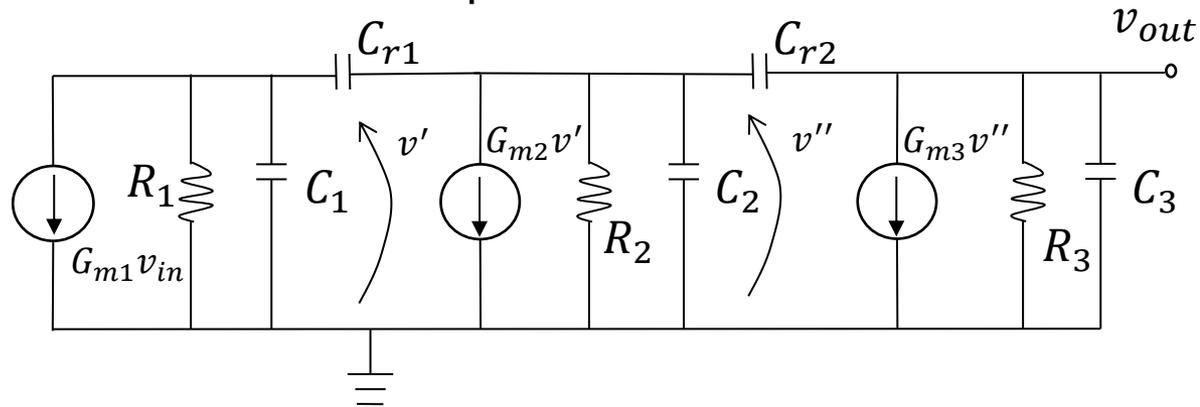
Contents

- Research Objective & Background
- Stability Criteria
 - Nyquist Criterion and Bode Plot
 - Routh-Hurwitz Criterion
- **Proposed Method**
 - Ex.1: Two-stage amplifier with C compensation
 - Ex.2: Two-stage amplifier with C, R compensation
 - Ex.3: Three-stage amplifier with C compensation**
- Discussion & Conclusion

Three-stage Amplifier (3 poles)



Amplifier circuit



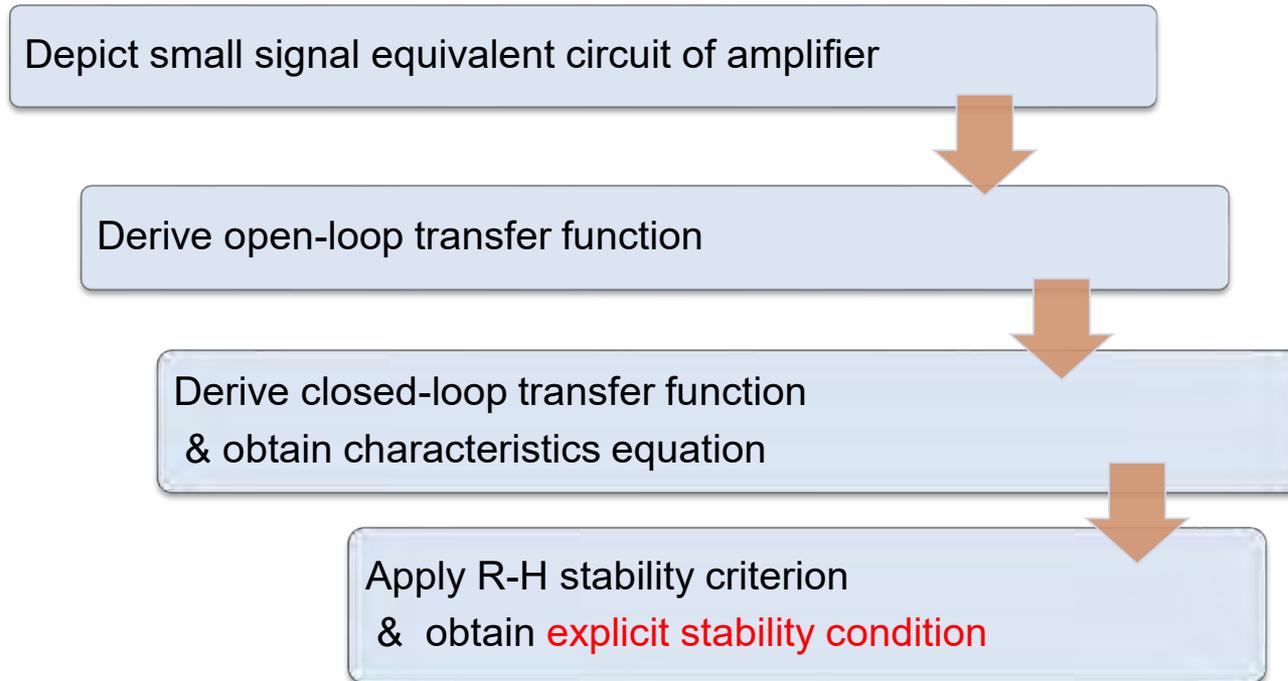
Small signal model

Proposed method can be applied in a similar manner.

Contents

- Research Objective & Background
- Stability Criteria
 - Nyquist Criterion and Bode Plot
 - Routh-Hurwitz Criterion
- Proposed Method
 - Ex.1: Two-stage amplifier with C compensation
 - Ex.2: Two-stage amplifier with C, R compensation
 - Ex.3: Three-stage amplifier with C compensation
- Discussion & Conclusion

Discussion of Proposed Method



Especially effective for

Multi-stage opamp (high-order system)

Limitation

Explicit transfer function with polynomials of s has to be derived.

Conclusion

- Proposal of Routh-Hurwitz method usage for analysis and design of operational amplifier stability
- Explicit circuit parameter conditions can be obtained for feedback stability.
- Consistency with Bode plot method has been confirmed with SPICE simulation.



Proposed method can be used with conventional Bode plot method.

Future work:

Relationship: θ or φ with gain and phase margins

Final Statement

- **Control theory** is theoretical basis of analog circuit design.
- **“Feedback”** is the most important concept there.



James Watt
1736 - 1819



Norbert Wiener
1894 - 1964



Harold Black
1898-1983



John Ragazzini
1912-1988

Acknowledgements

The authors would like to thank
Prof. Toshiyuki Kitamori
Prof. Hiroshi Tanimoto and
Dr. Yuji Gendai
for stimulating and valuable comments.

Thank you

for your kind attention!



マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器の DWAアルゴリズム

群馬大学 工学部 電気電子工学科

萩原広之 元澤篤史 小林春夫

小室貴紀 傘 昊

発表内容

- 研究目的
- マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの応用
- まとめ

発表内容

- **研究目的**
- マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
の応用
- まとめ

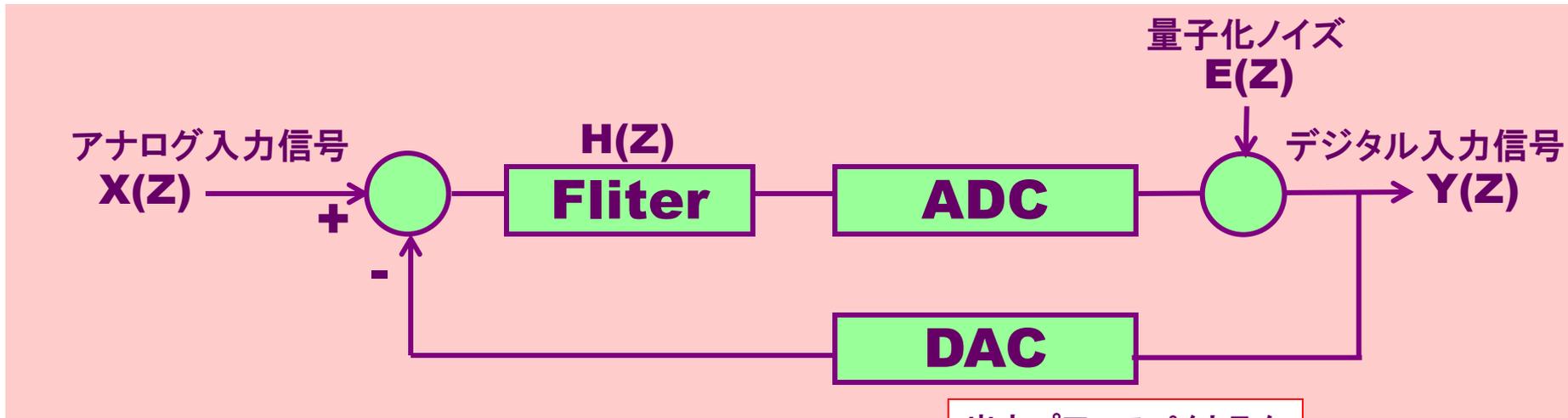
研究目的

- マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器の新たな応用の提案を行う。
- マルチバンドパス用**DWA**アルゴリズムを開発する。
- そのアルゴリズムの他の変調器への応用を行う。

発表内容

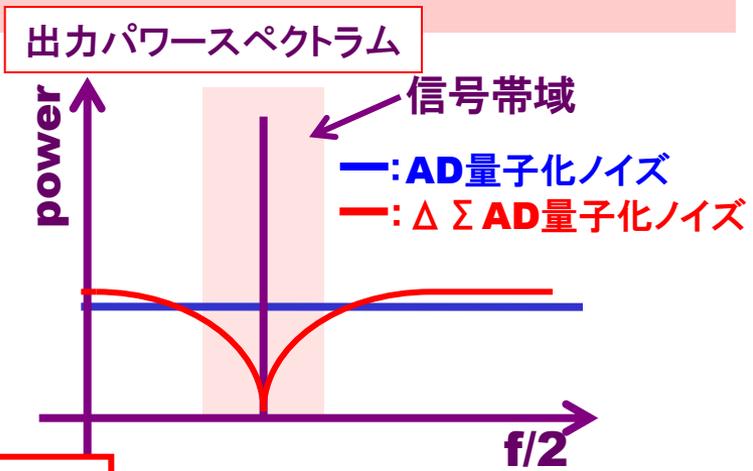
- 研究目的
- **マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器**
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
の応用
- まとめ

ΔΣAD変調器



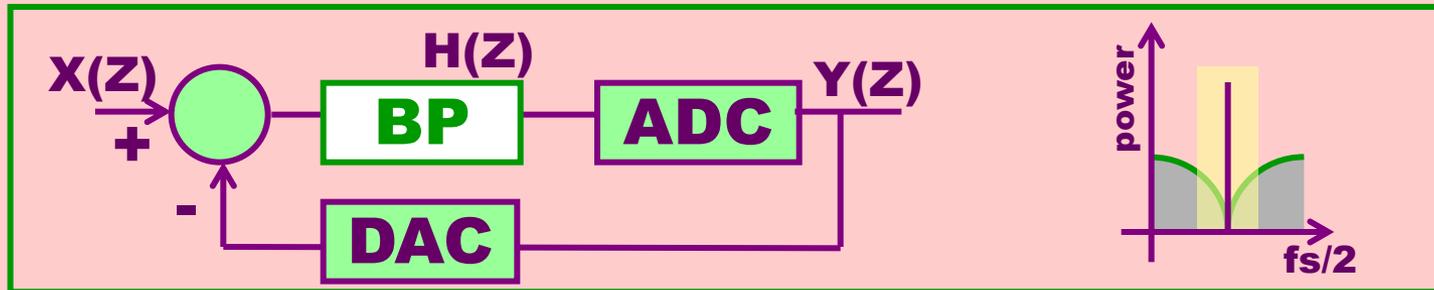
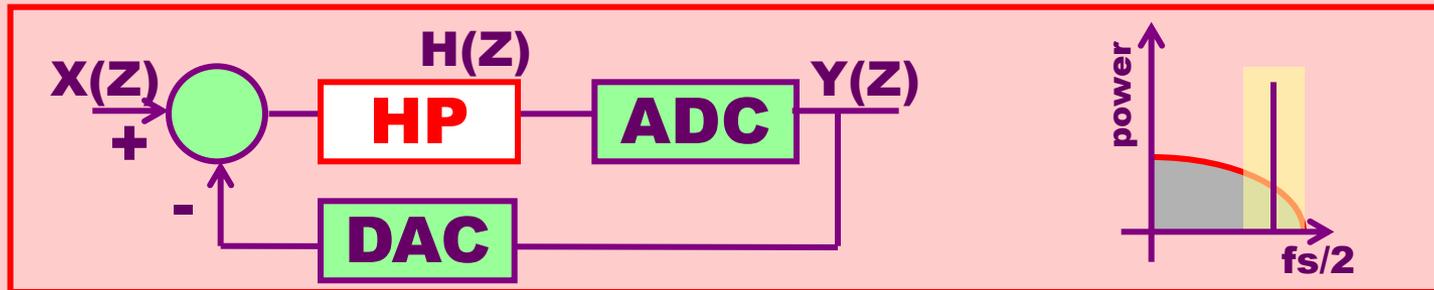
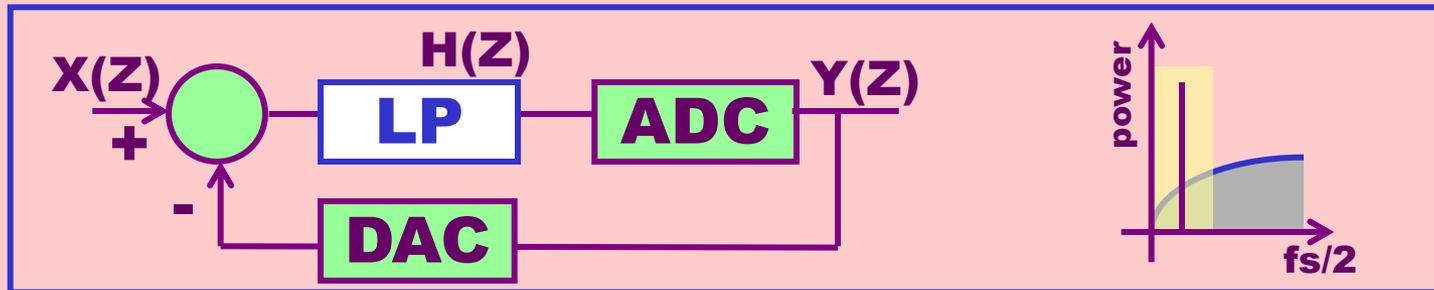
$$Y(Z) = \frac{H(Z)}{1+H(Z)} X(Z) + \frac{1}{1+H(Z)} E(Z)$$

↓ 1 ↓ 0

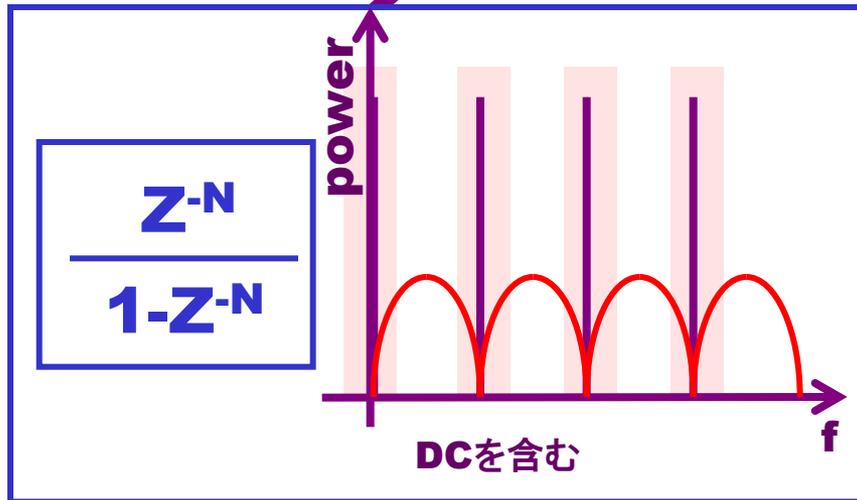
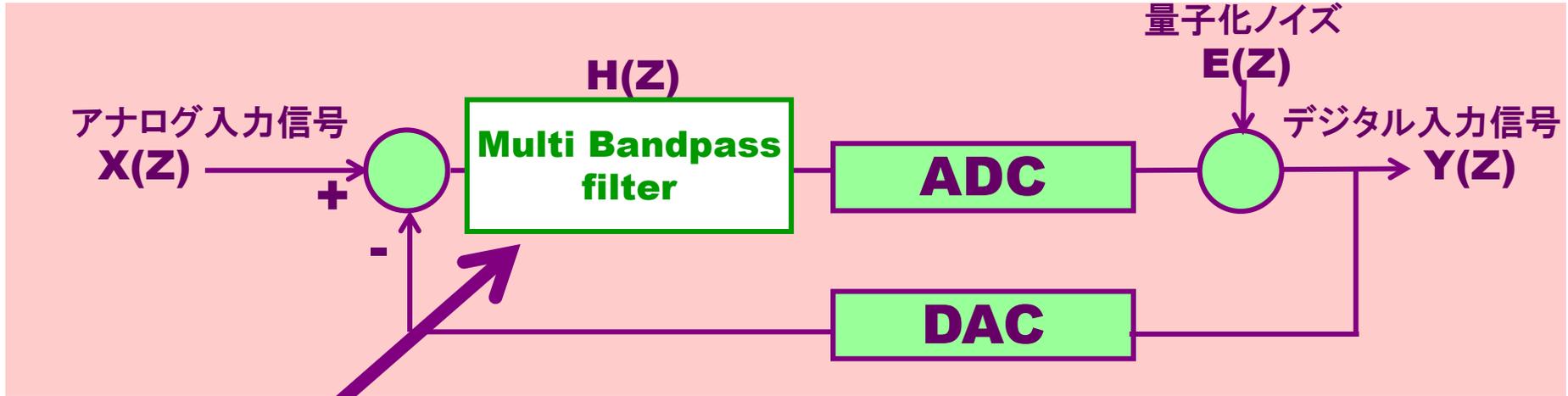


高精度なAD変換を実現

これまでの $\Delta\Sigma$ AD変調器



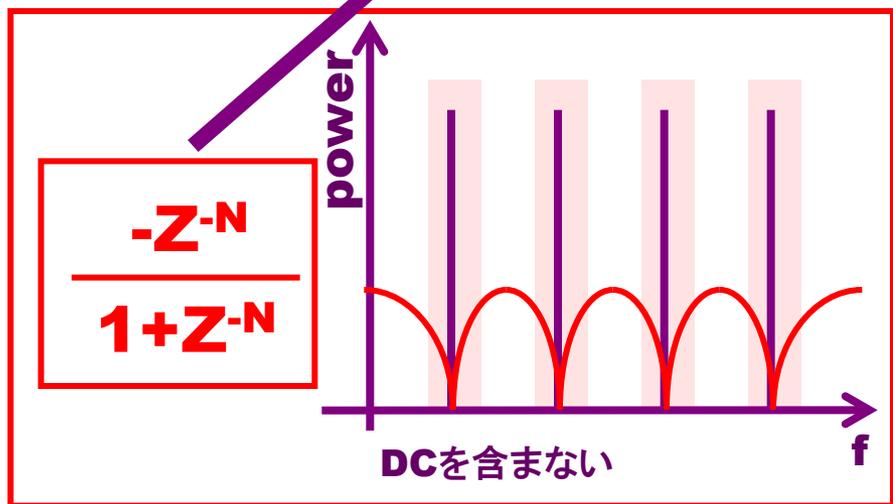
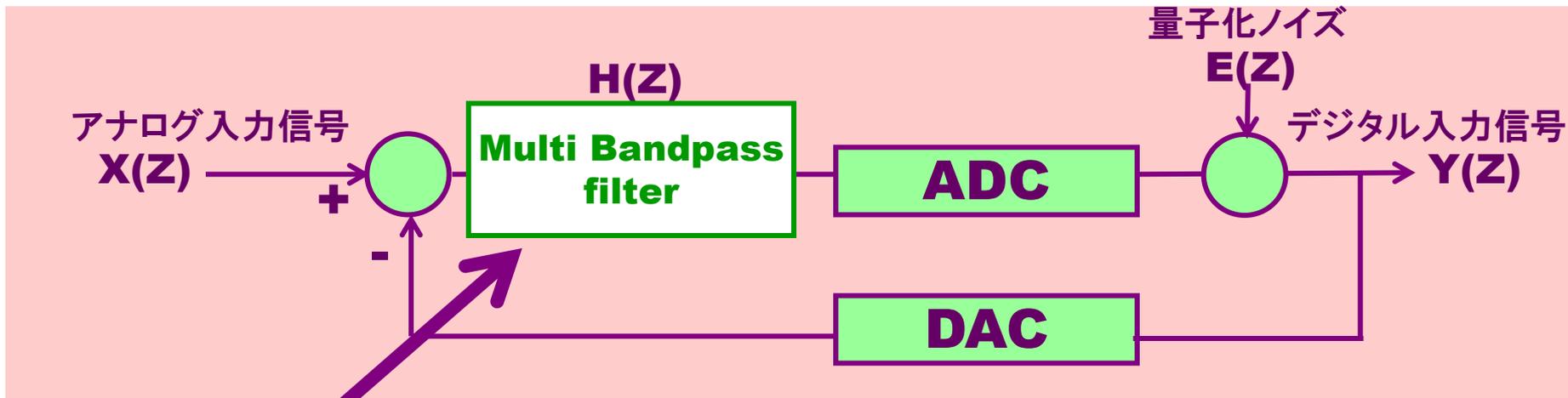
マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ AD変調器 タイプ 1



信号帯域が複数

その中心周波数は
サンプリング周波数の
0, 1/N, 2/N, 3/N, 5/N,

マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ AD変調器 タイプ2



信号帯域が複数

その中心周波数は
サンプリング周波数の
 $1/N, 3/N, 5/N, 7/N, \dots$

発表内容

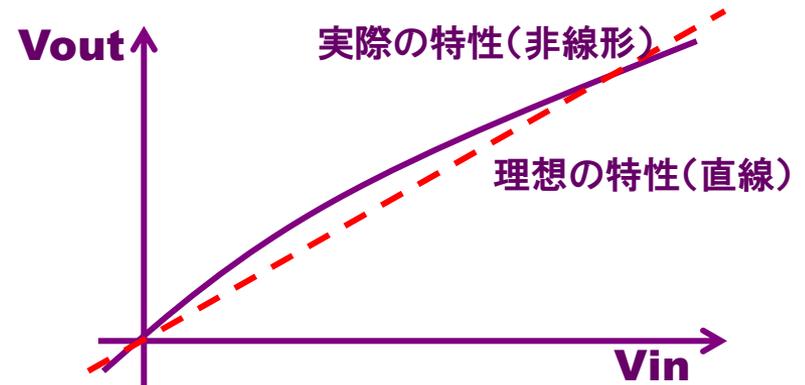
- 研究目的
- マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器
- **電子部品の線形性計測への応用**
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
の応用
- まとめ

リニア・アナログ回路と非線形性

リニア・アナログ回路
(アンプ、DA変換器、スイッチ等)



非線形性により歪みが生じる



$$X(t) = \cos(\omega t)$$



$$Y(t) = A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(2\omega t) + A_3 \cos(3\omega t) + \dots$$

マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ AD変調器の 高調波歪み測定への応用の提案

シングルエンド回路・信号のリニア・アナログ回路の場合

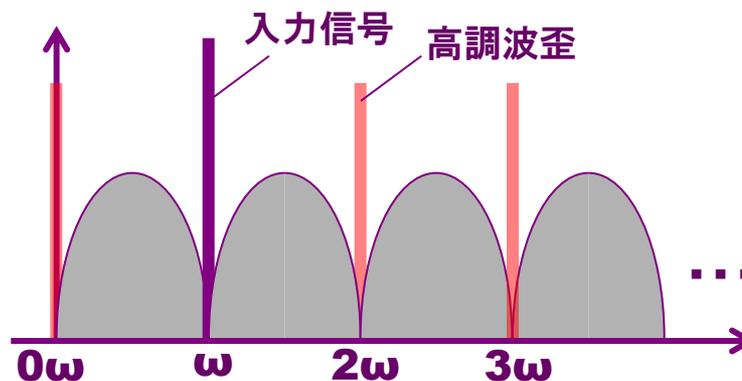
基本波とともに

0次、2次、3次、4次、.... の高調波を高精度に**AD変換**

タイプ I のマルチバンドパス変調器を使用

内部フィルタ

$$\frac{Z^{-N}}{1-Z^{-N}}$$



マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ AD変調器の 高調波歪み測定への応用の提案

差動回路・信号のリニア・アナログ回路の場合
偶数次の高調波はキャンセルされる

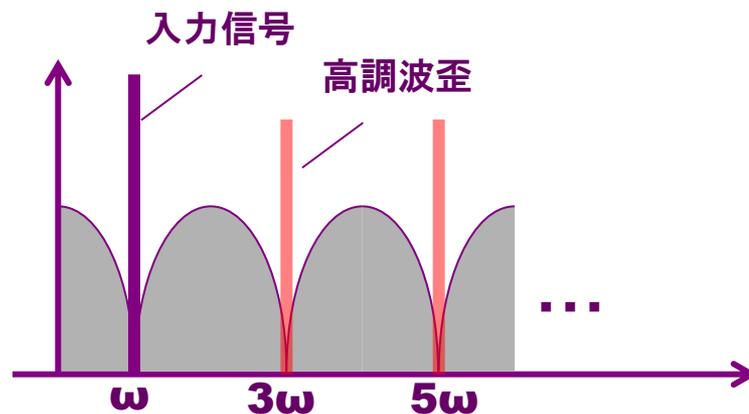
基本波とともに

3次、5次、7次、.... の高調波を高精度にAD変換

タイプ II のマルチバンドパス変調器を使用

内部フィルタ

$$\frac{-Z^{-N}}{1+Z^{-N}}$$

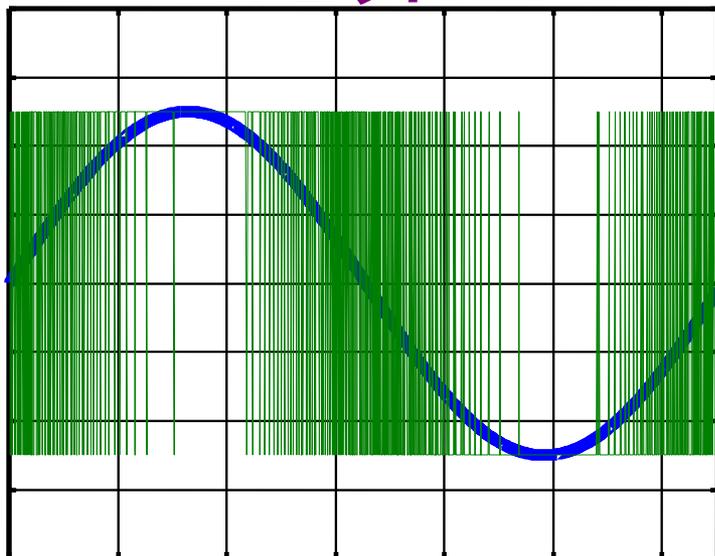


発表内容

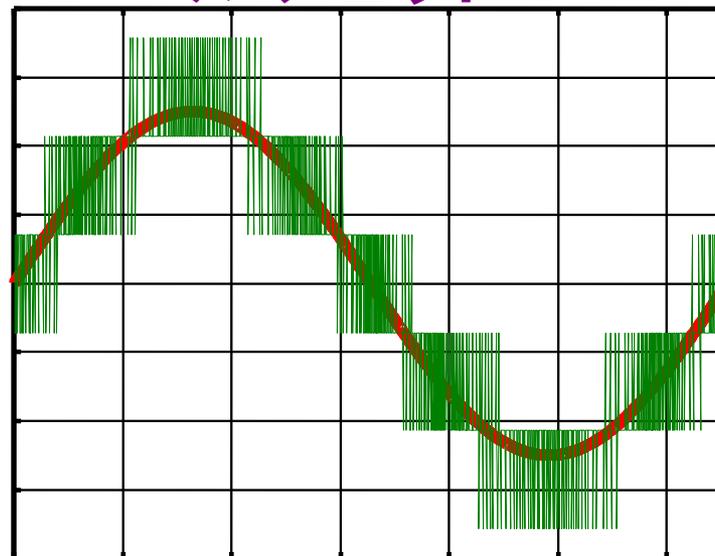
- 研究目的
- マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- **マルチバンドパス用DWAアルゴリズム**
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
の応用
- まとめ

変調器内ADC/DAC

1ビット



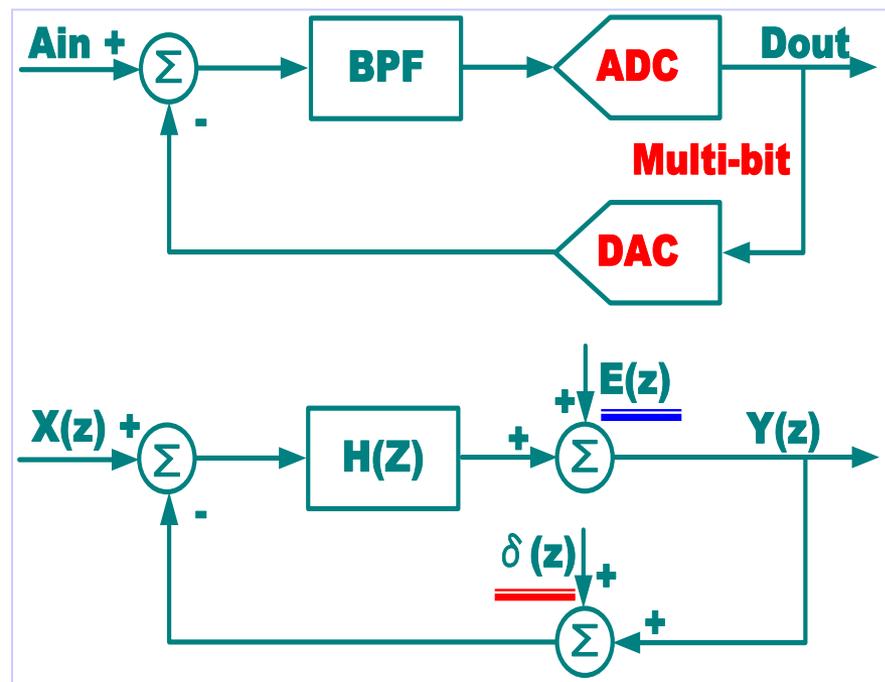
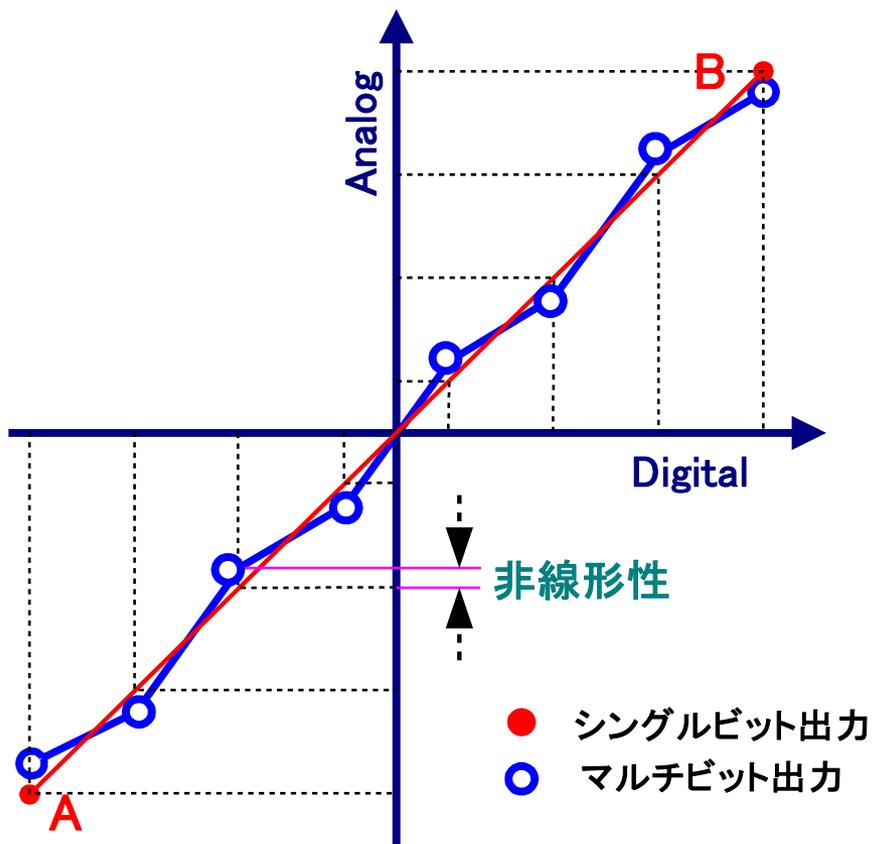
マルチビット



- 1ビット変調器
フィードバックの**DAC**の線形性が保証される
回路構成が比較的容易
- マルチビット変調器
低消費電力化（アンプのスルーレート要求緩和）

マルチビット**DAC**の非線形性が問題

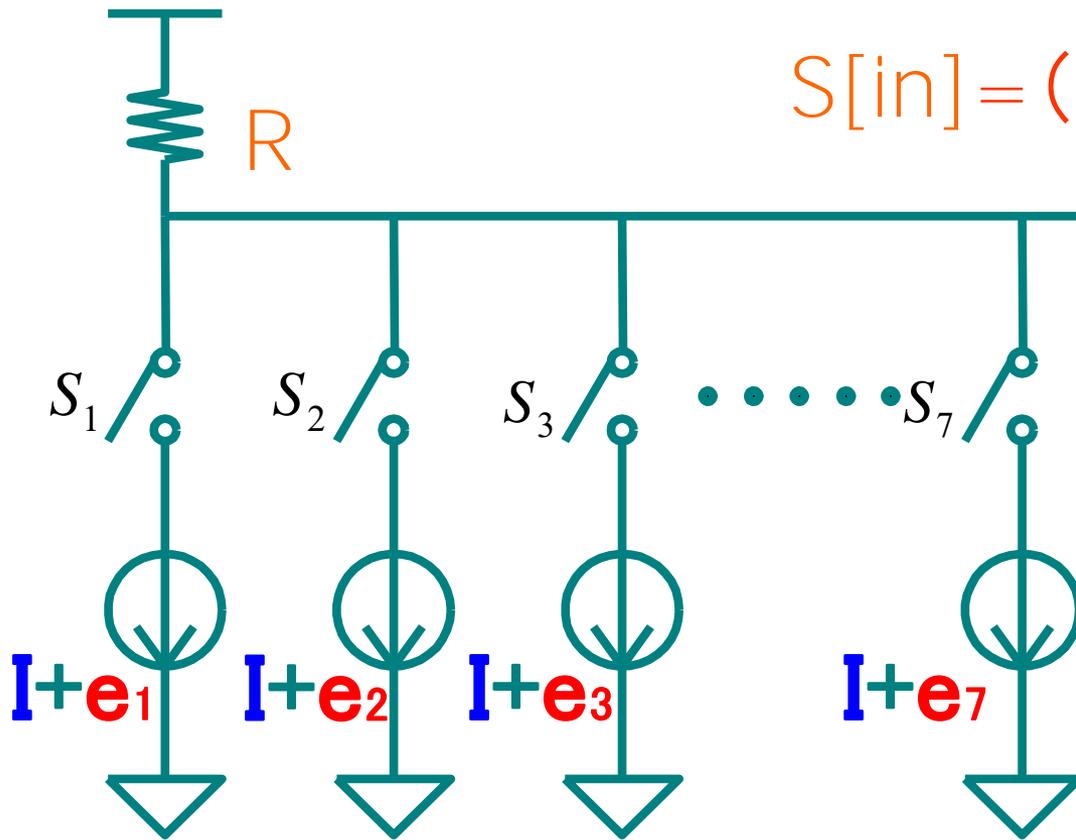
Multi-bit DACの非線形性



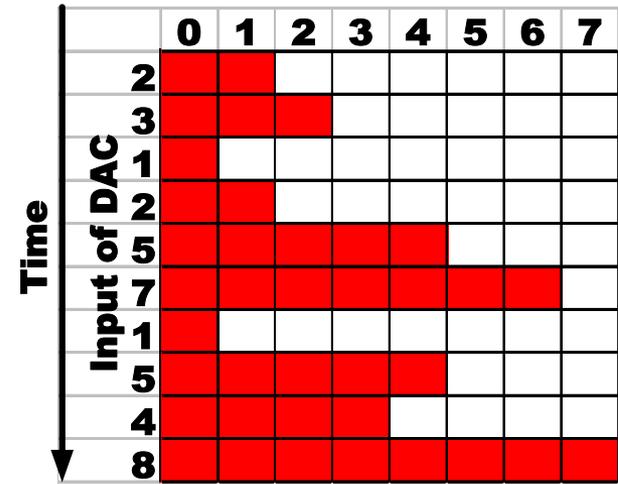
$$Y(z) = \frac{H(z)}{1+H(z)} \cdot [X(z) - \delta(z)] + \frac{1}{1+H(z)} \cdot E(z)$$

$\delta(z)$: ノイズ・シェープされない。
高精度化の障害

セグメント・電流セル型DACの非線形性



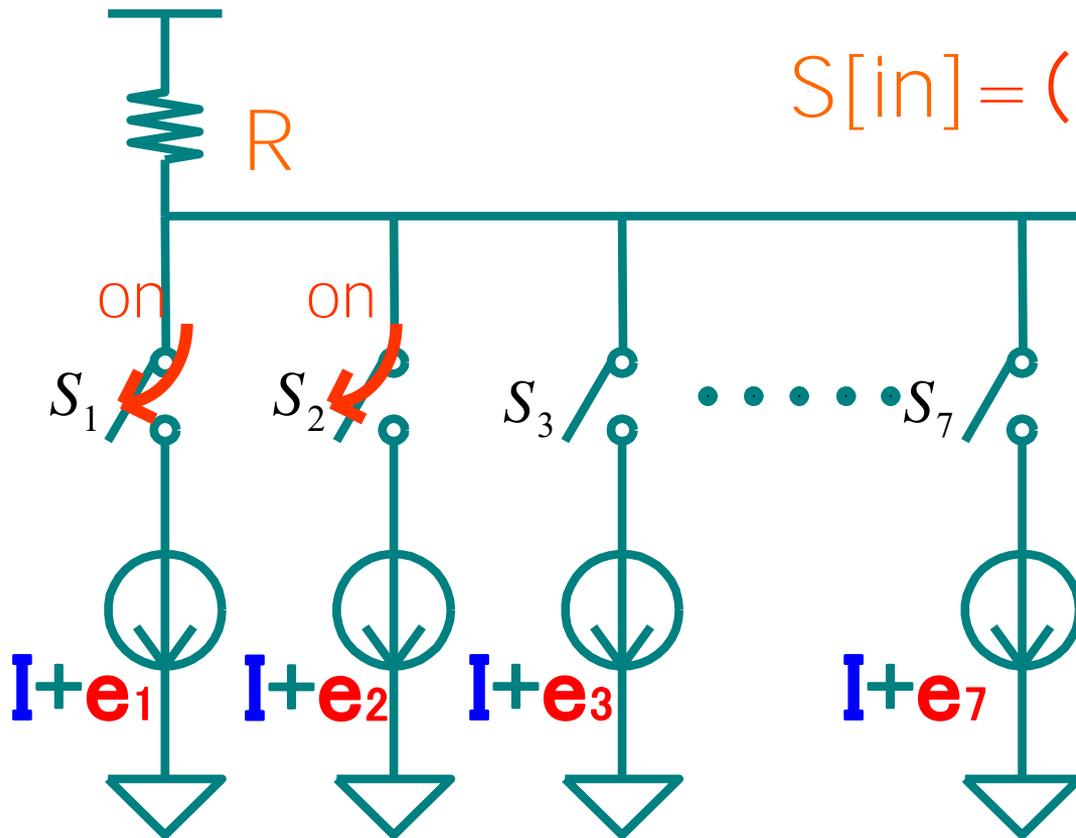
$$S[in] = (2; 3; 1)$$



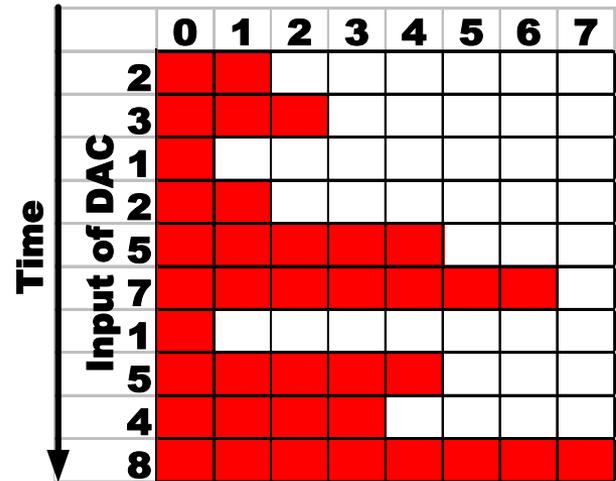
$$V_{out} = R \cdot I \cdot S[in]$$

電流セルのミスマッチ ($e_1, e_2, e_3, \dots, e_7$) がDACの非線形性

セグメント・電流セル型DACの非線形性



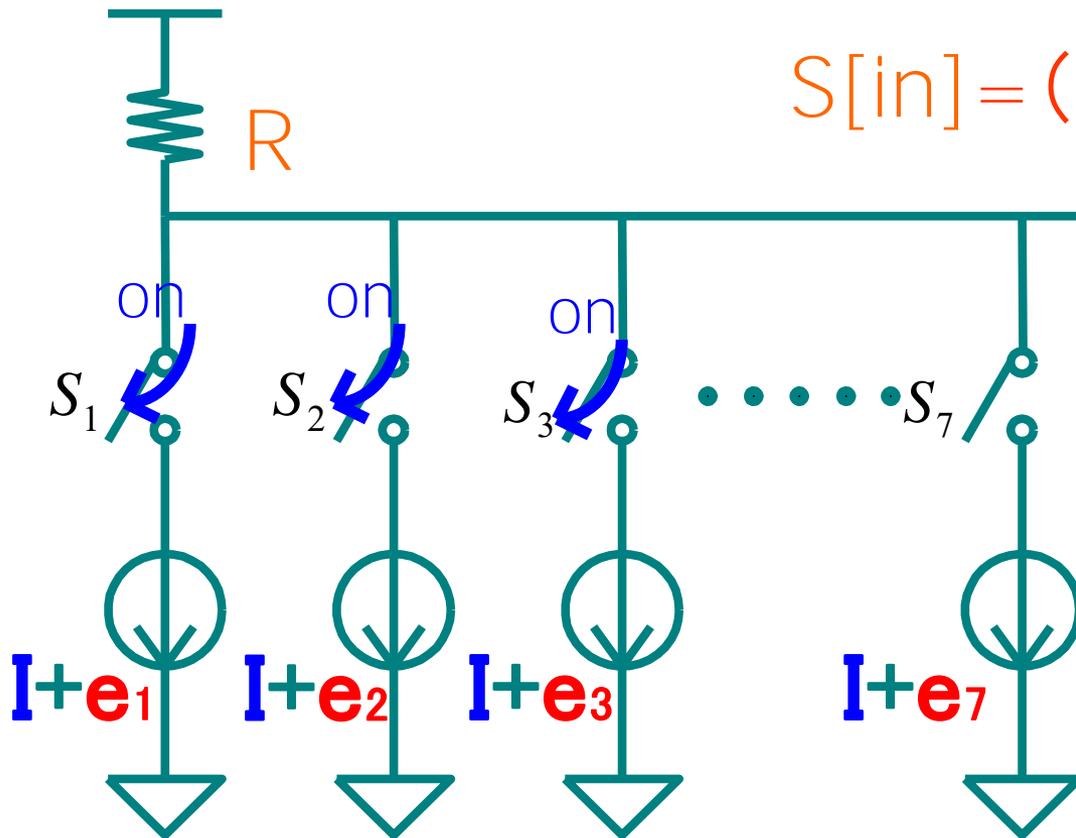
$$S[in] = (2; 3; 1)$$



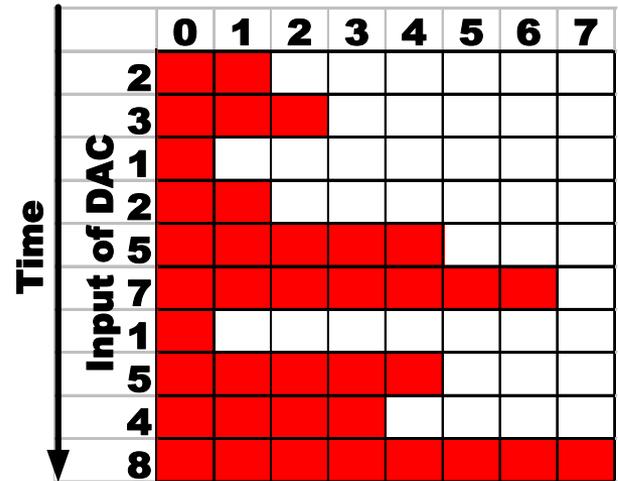
$$V_{out} = R \cdot I \cdot S[in]$$

電流セルのミスマッチ ($e_1, e_2, e_3, \dots, e_7$) がDACの非線形性

セグメント・電流セル型DACの非線形性



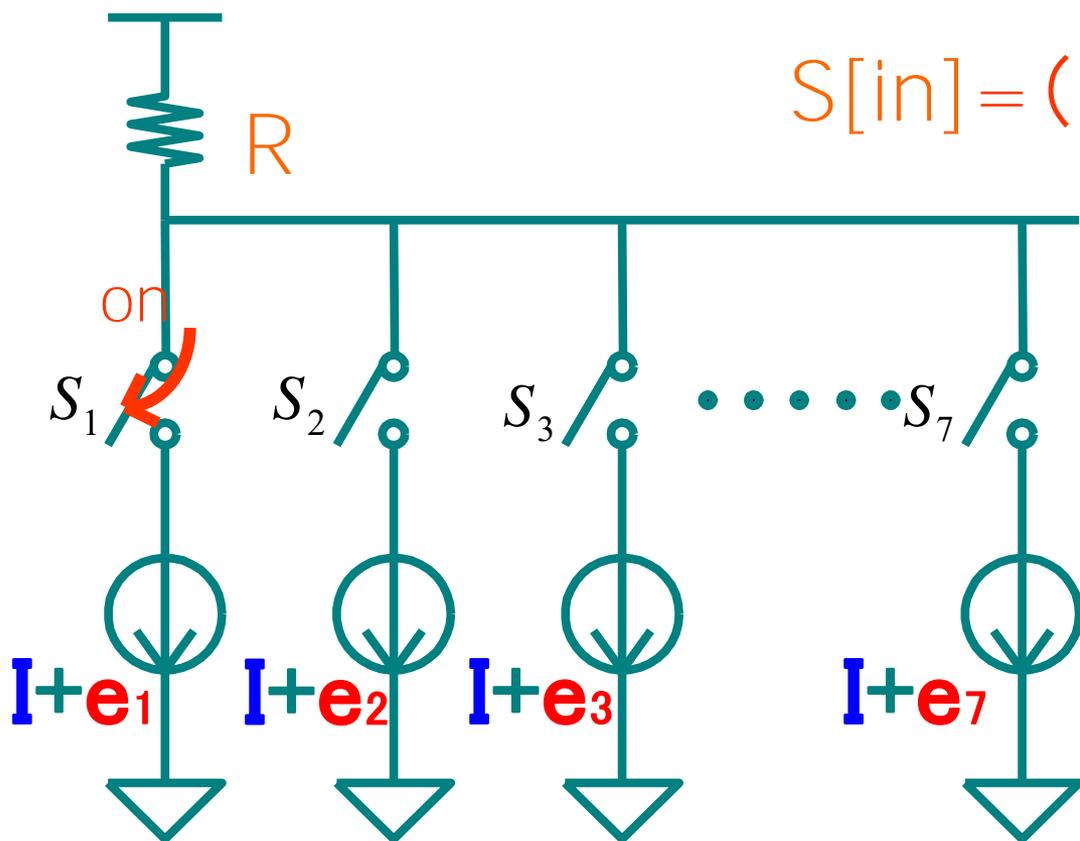
$$S[in] = (2; 3; 1)$$



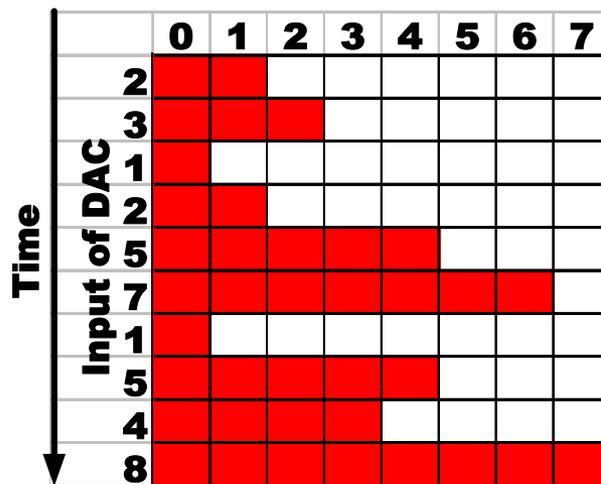
$$V_{out} = R \cdot I \cdot S[in]$$

電流セルのミスマッチ ($e_1, e_2, e_3, \dots, e_7$) がDACの非線形性

セグメント・電流セル型DACの非線形性



$$S[in] = (2; 3; 1)$$

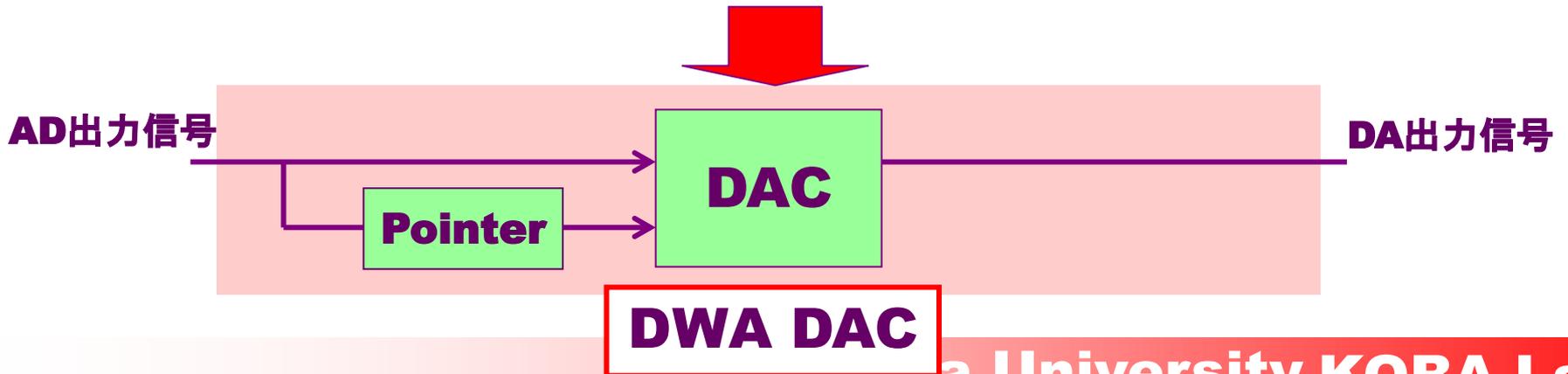
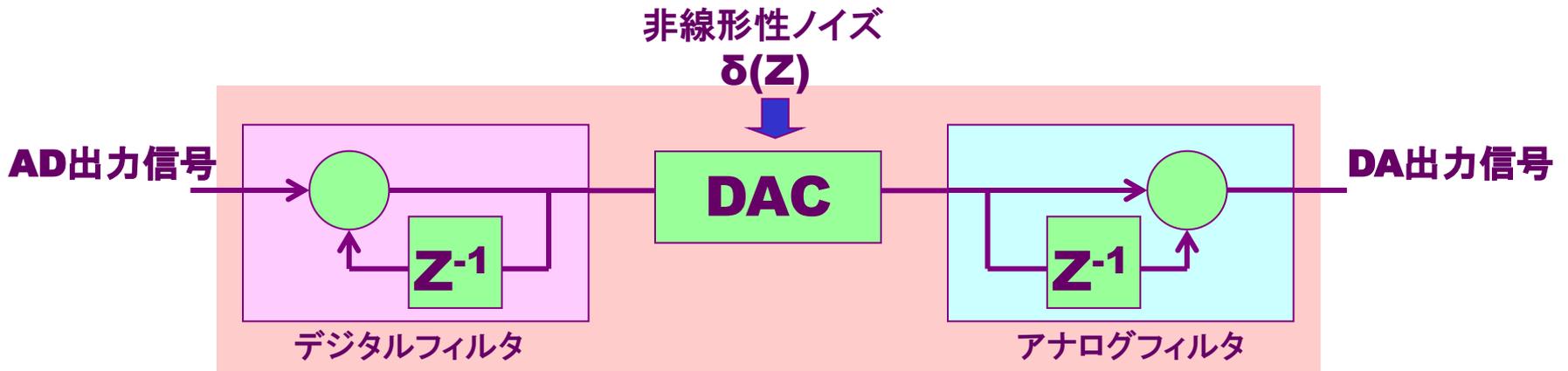


$$V_{out} = R \cdot I \cdot S[in]$$

電流セルのミスマッチ ($e_1, e_2, e_3, \dots, e_7$) がDACの非線形性

DWA手法

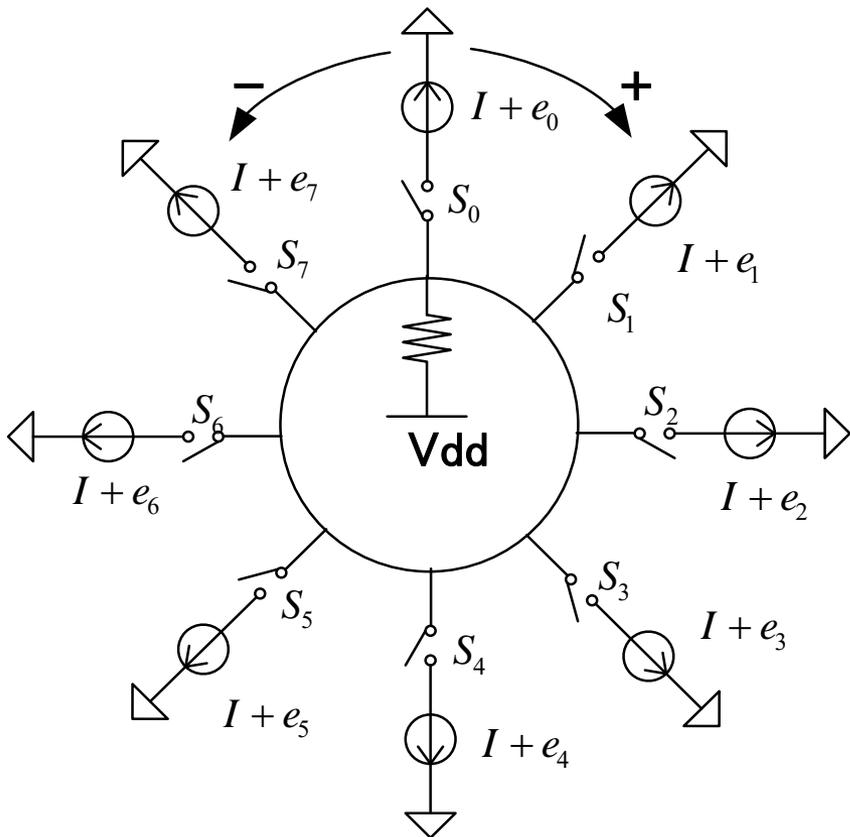
一定のアルゴリズムの下で素子を選択し、非線形性を軽減する手法



タイプI マルチバンドパス DWAアルゴリズム

- セグメント型DACセルを選択するため
N個のポインタ使用
- LP DWAアルゴリズムを
Nチャンネル・インターリーブ

LowPass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム



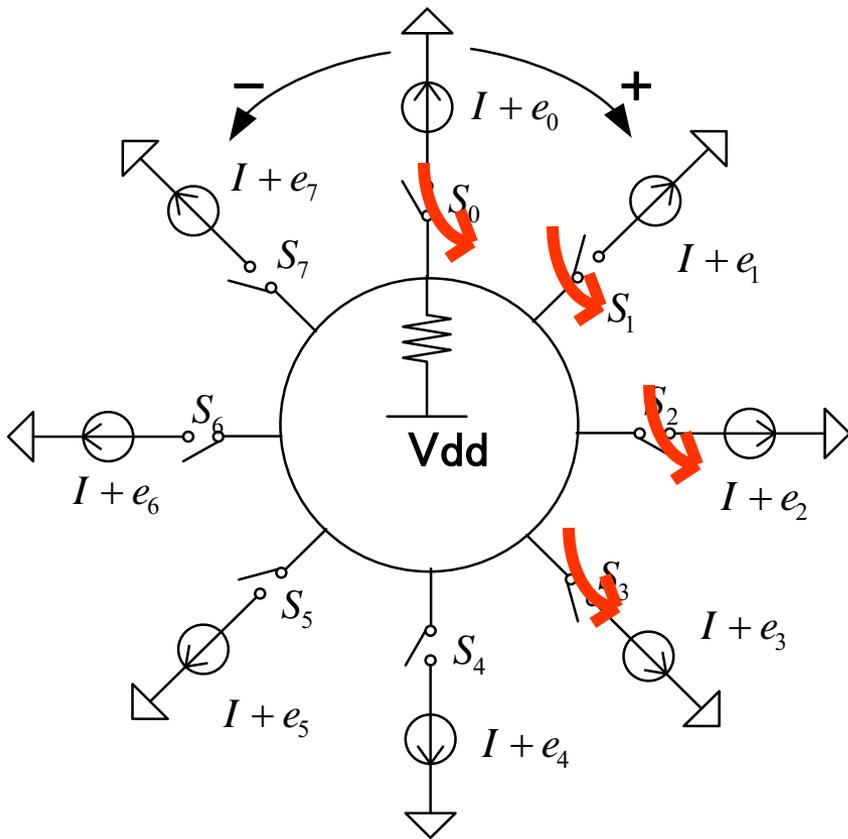
$$H(z) = 1 / (1 - Z^{-1})$$

Time

	0	1	2	3	4	5	6	7
4								
3								
2								
2								
5								
7								
1								
5								
4								
8								

Input of DAC

LowPass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム

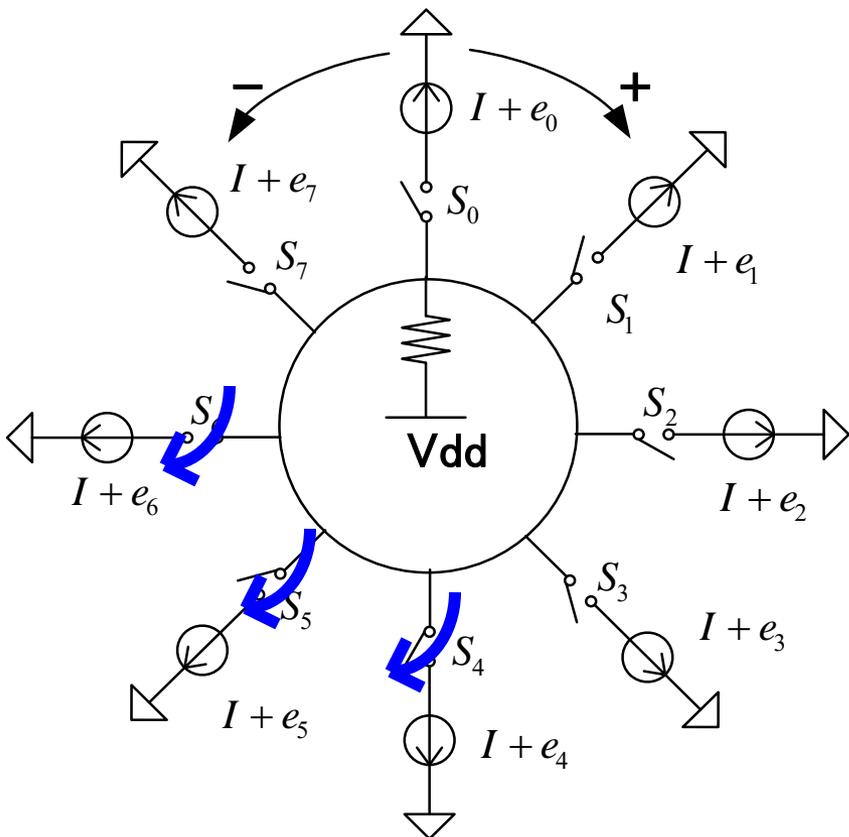


$$H(z) = 1 / (1 - Z^{-1})$$

Time ↓

Input of DAC	0	1	2	3	4	5	6	7
4	Red	Red	Red	Red	White	White	White	White
3	White	White	White	White	Red	Red	Red	Red
2	Red	White	White	White	White	White	White	Red
2	White	Red	Red	White	White	White	White	White
5	White	White	Red	Red	Red	Red	Red	Red
7	Red	Red	Red	Red	Red	Red	White	White
1	White	Red						
5	Red	Red	Red	Red	White	White	White	White
4	Red	White	White	White	Red	Red	Red	Red
8	Red							

LowPass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム



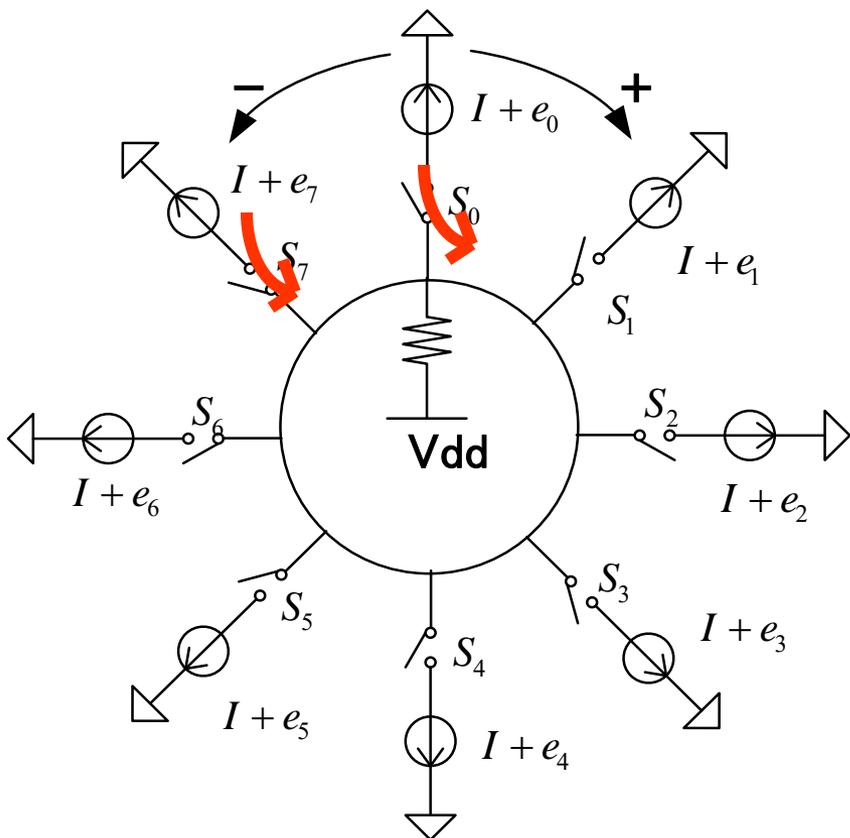
$$H(z) = 1 / (1 - Z^{-1})$$

Time ↓

	0	1	2	3	4	5	6	7
4								
3								
2								
2								
5								
7								
1								
5								
4								
8								

Input of DAC

LowPass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム



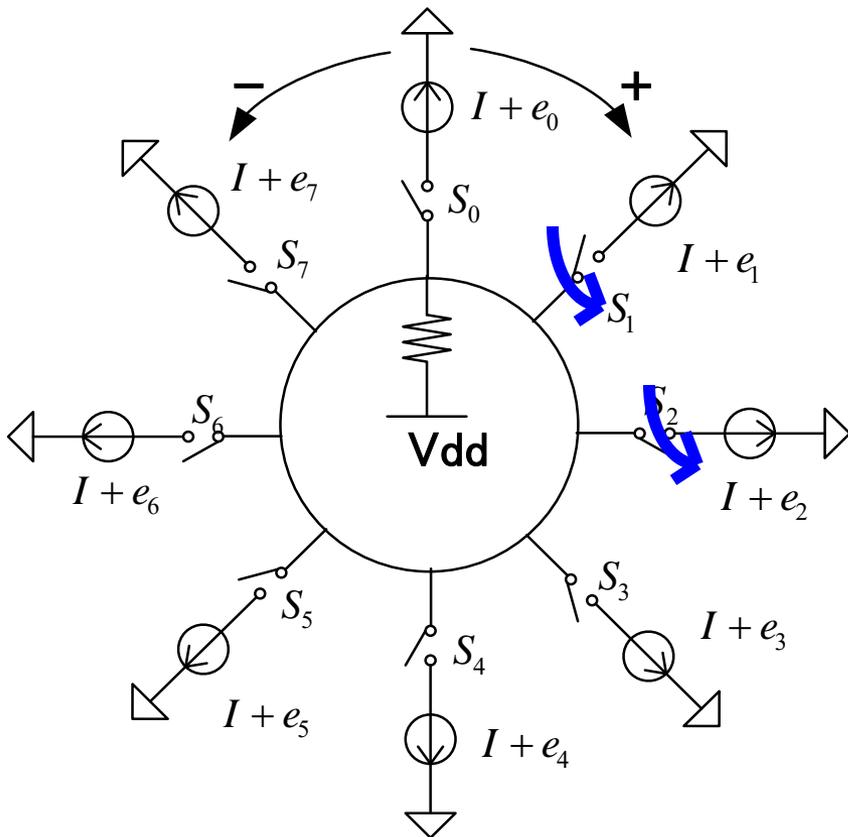
$$H(z) = 1 / (1 - Z^{-1})$$

Time

	0	1	2	3	4	5	6	7
4								
3								
2								
2								
5								
7								
1								
5								
4								
8								

Input of DAC

LowPass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム



$$H(z) = 1 / (1 - Z^{-1})$$

Time ↓

Input of DAC	0	1	2	3	4	5	6	7
4								
3								
2								
2								
5								
7								
1								
5								
4								
8								

$$\frac{Z^N}{1-Z^N}$$

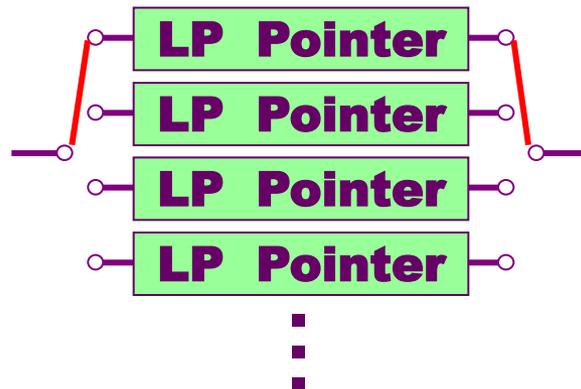
LP ⇒ マルチ BP

LPアルゴリズム



	0	1	2	3	4	5	6	7
4	→							
2				→				
6	→					→		
5	→			→				
5		→						
3	→					→		
7		→						

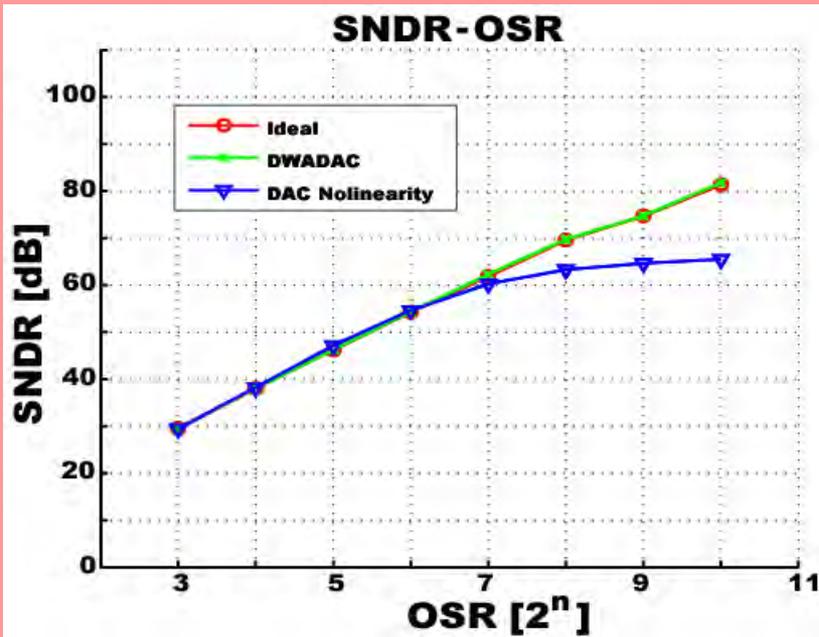
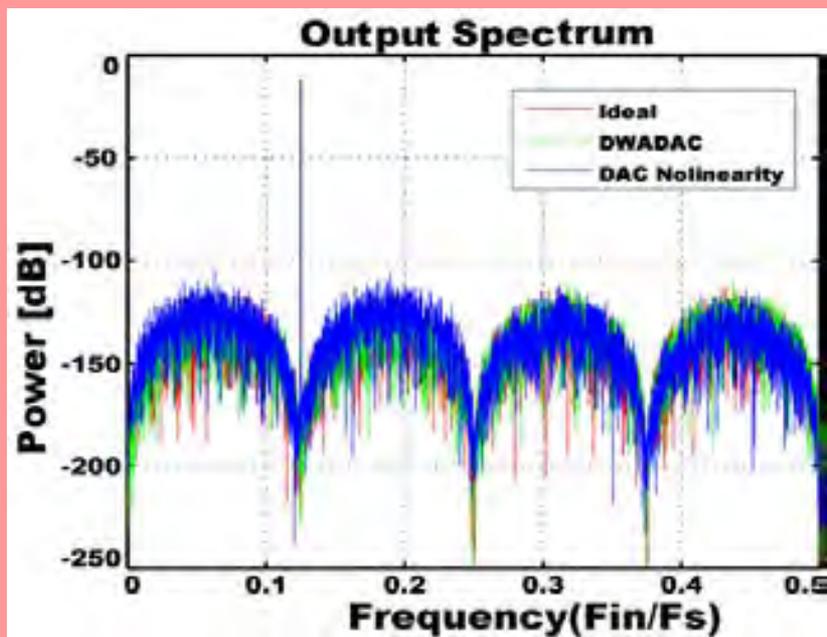
マルチBPアルゴリズム



N=4

	0	1	2	3	4	5	6	7
4	→							
2	→							
6	→							
5	→							
5	→				→			
3		→						
7	→							

N=8の場合のタイプI マルチバンドパス変調器

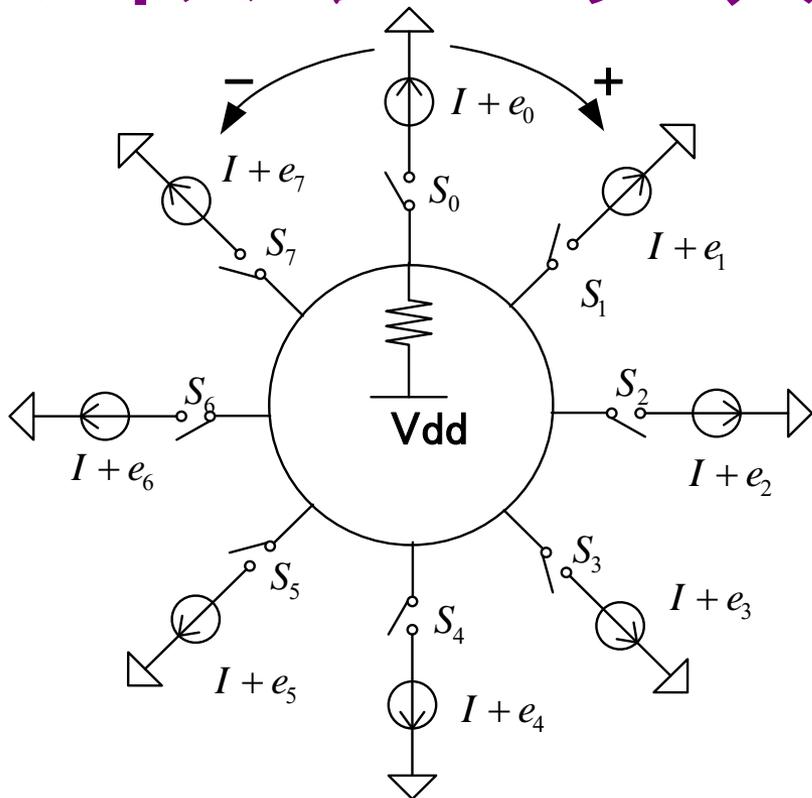


提案DWAアルゴリズムの効果を
シミュレーションで確認

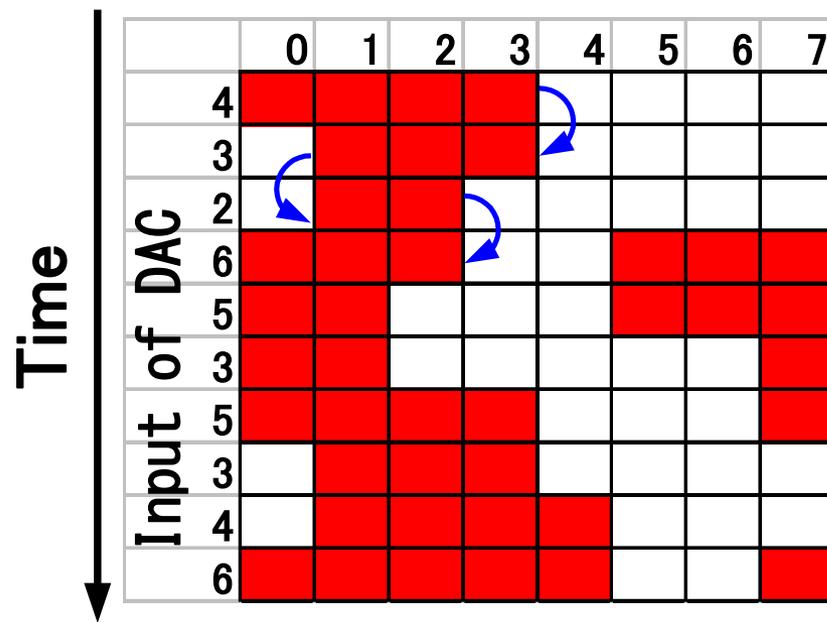
タイプII マルチバンドパス DWAアルゴリズム

- セグメント型**DAC**セルを選択するため
N個のポインタ使用
- **HP DWA**アルゴリズムを
Nチャンネル・インターリーブ

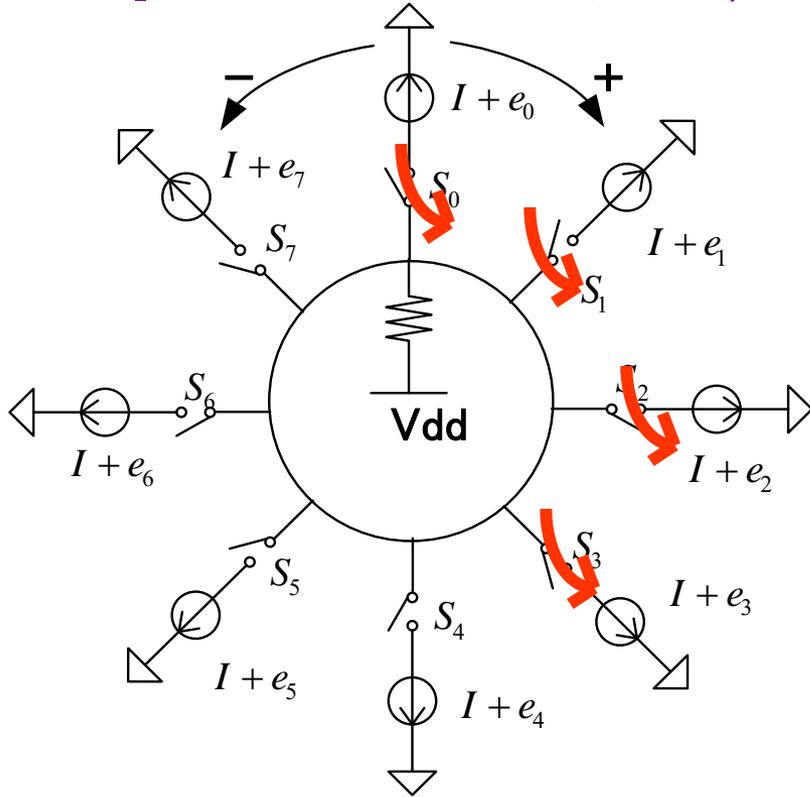
High Pass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム



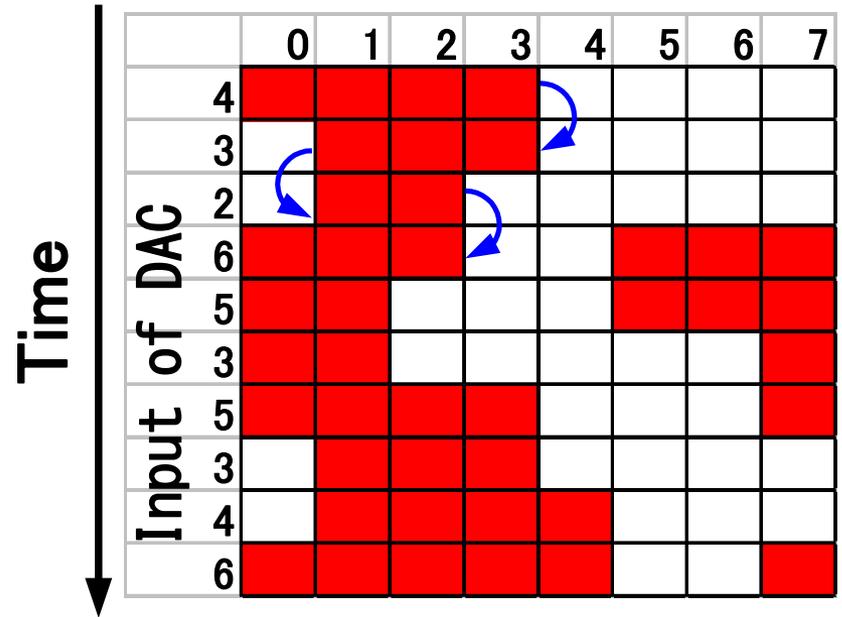
$$H(z) = 1/1 + Z^{-1}$$



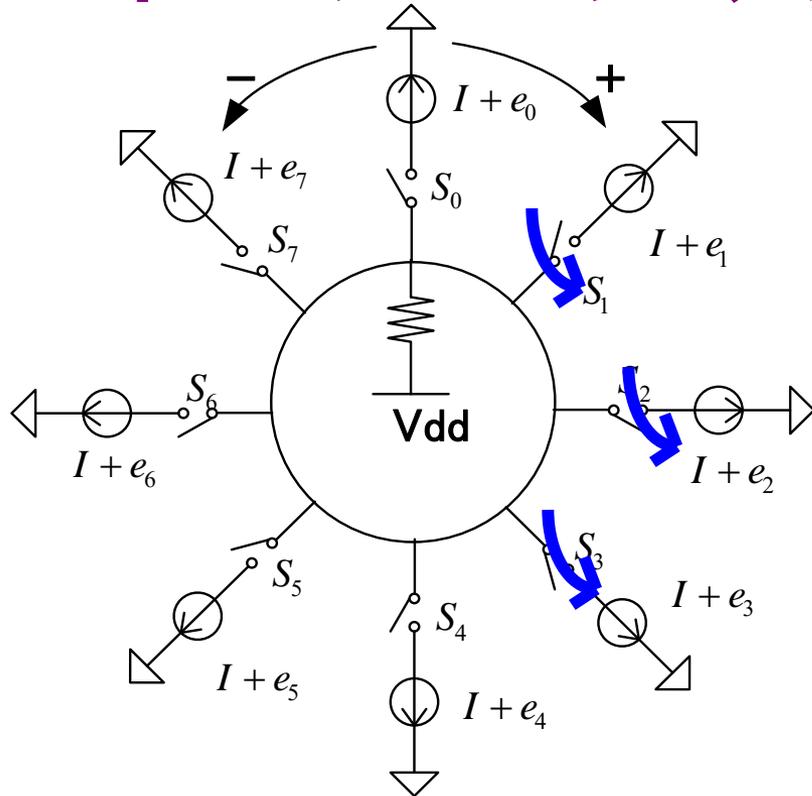
High Pass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム



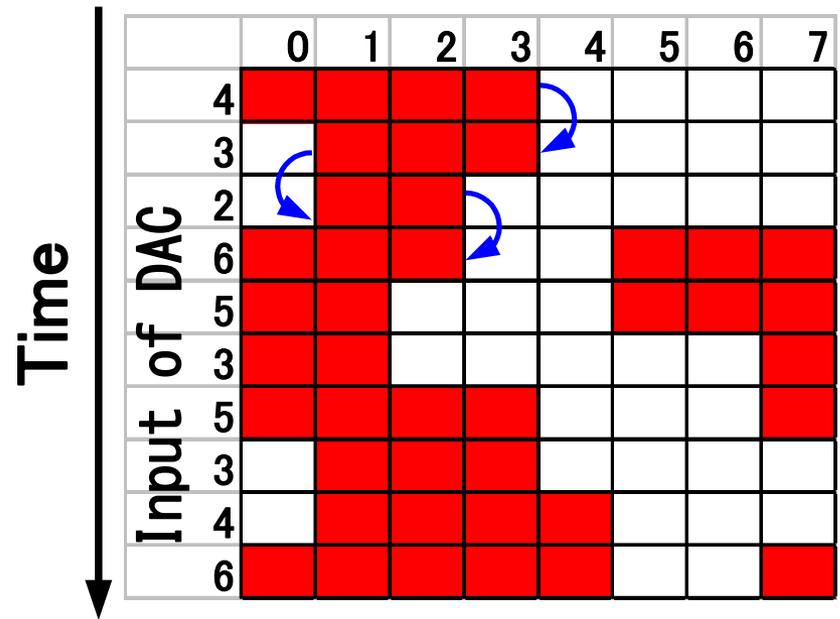
$$H(z) = 1/1 + Z^{-1}$$



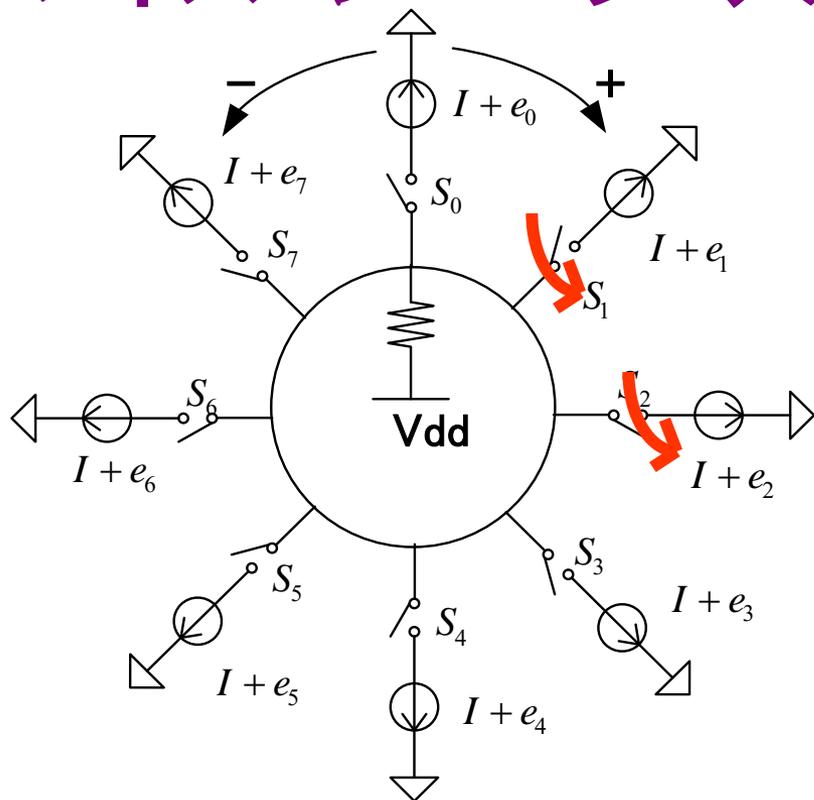
High Pass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム



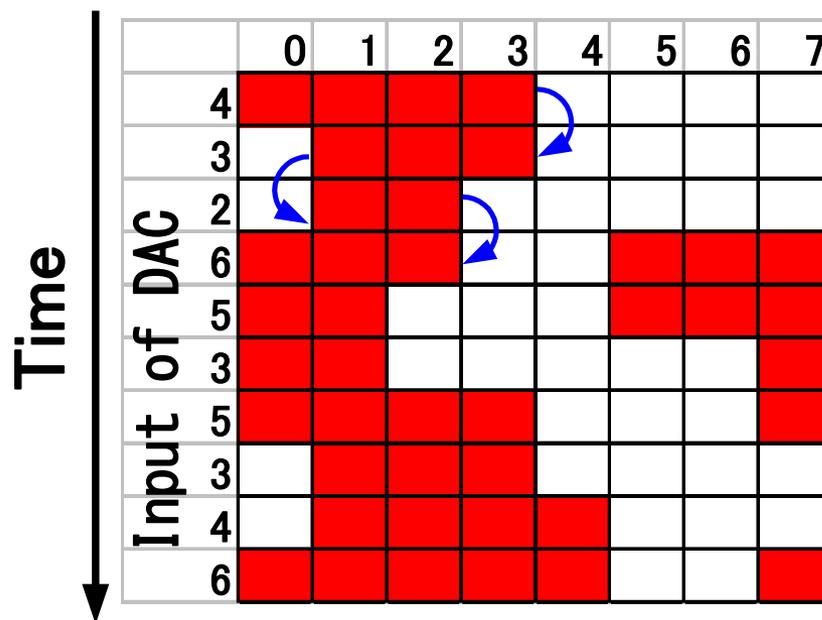
$$H(z) = 1/1 + Z^{-1}$$



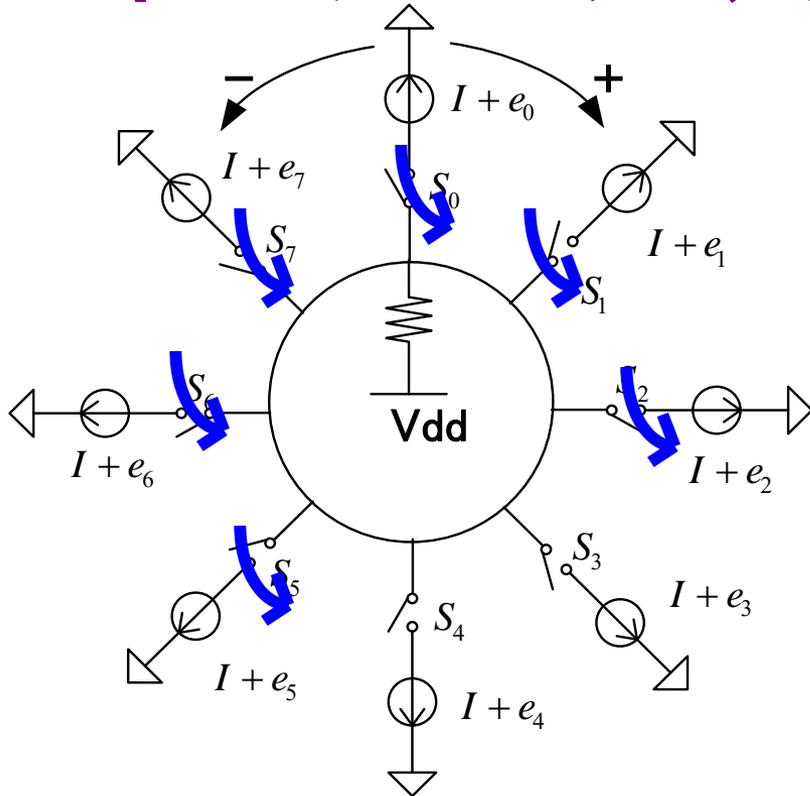
High Pass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム



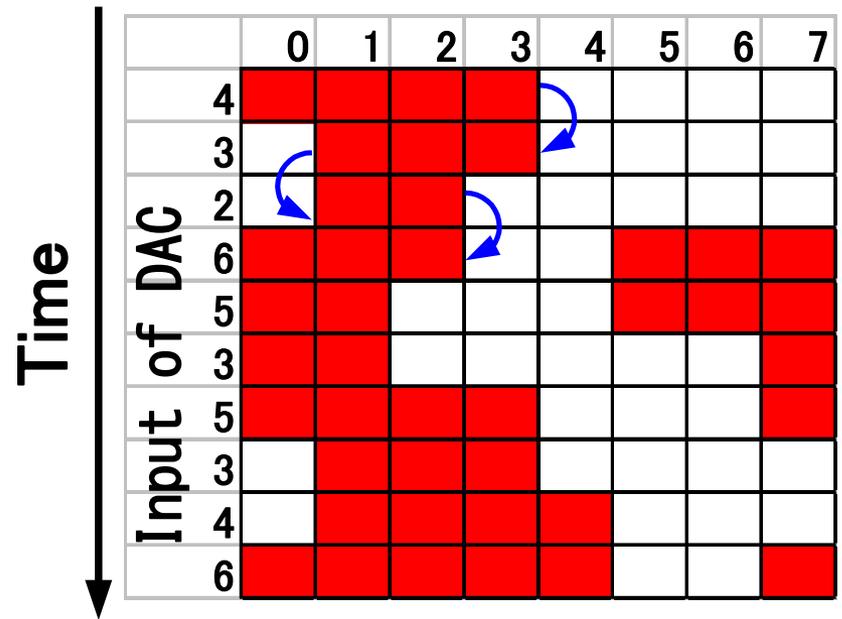
$$H(z) = 1/1 + Z^{-1}$$



High Pass DAC非線形性 ノイズ・シェープ・アルゴリズム



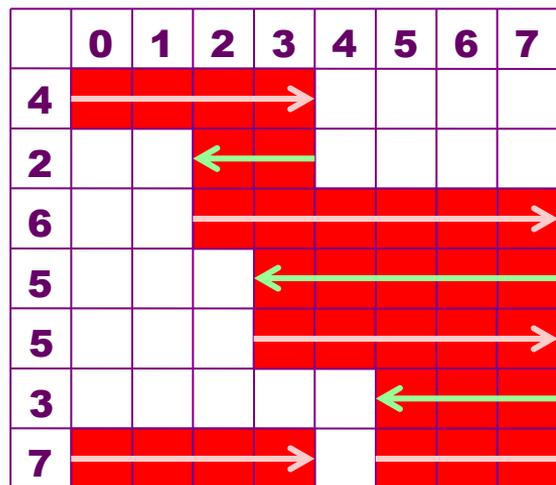
$$H(z) = 1/1 + Z^{-1}$$



$$\frac{-Z^{-N}}{1+Z^{-N}}$$

HP ⇒ BP ⇒ マルチBP

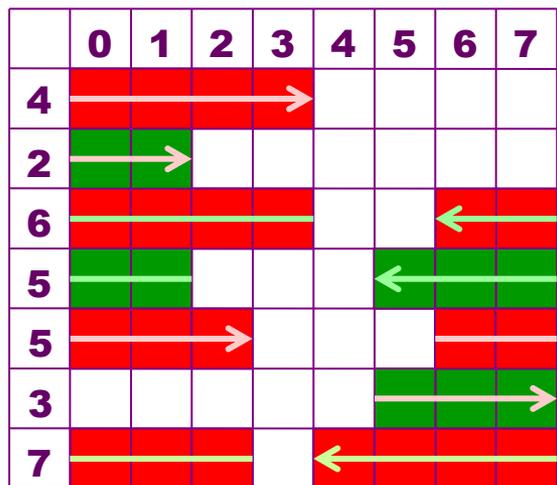
HPアルゴリズム



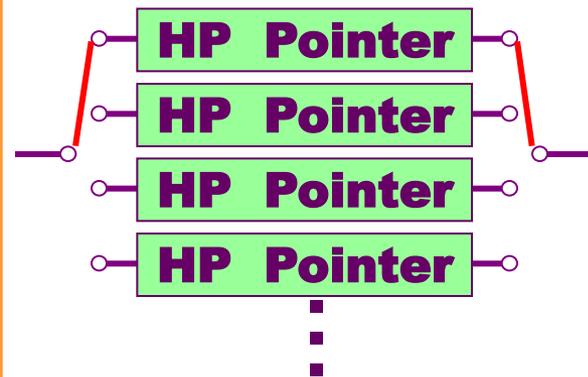
BPアルゴリズム



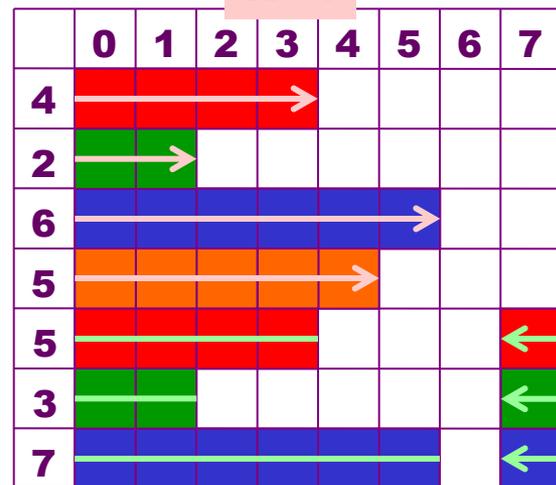
1回の出力ごとに切り替える



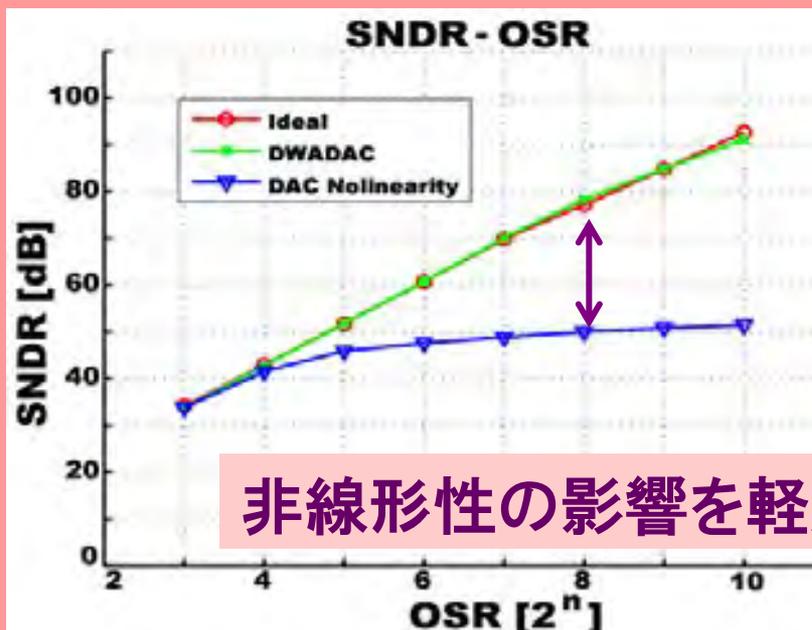
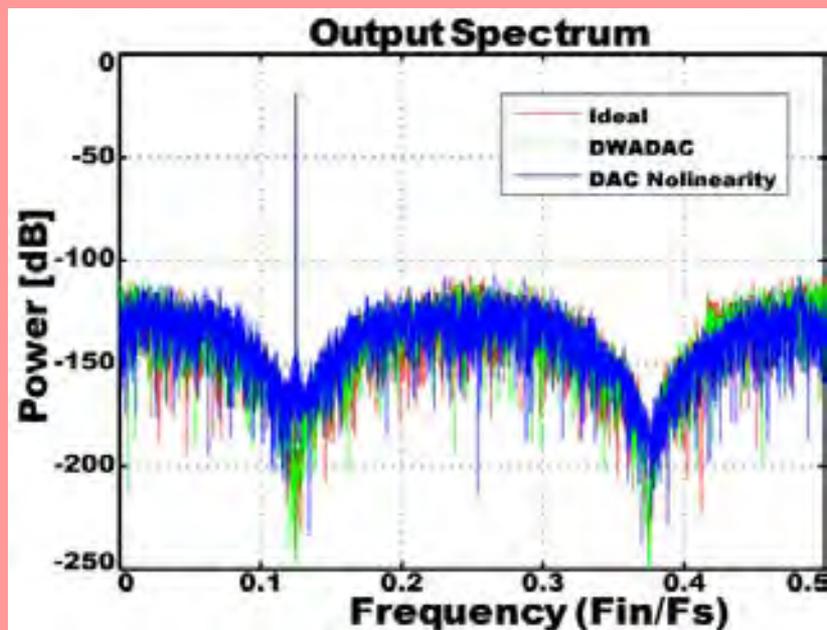
マルチBPアルゴリズム



N=4



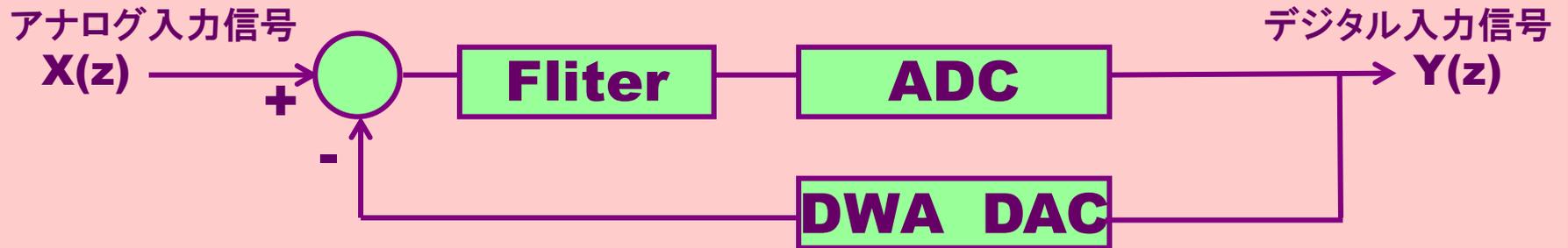
N=4の場合のタイプII マルチバンドパス変調器



非線形性の影響を軽減

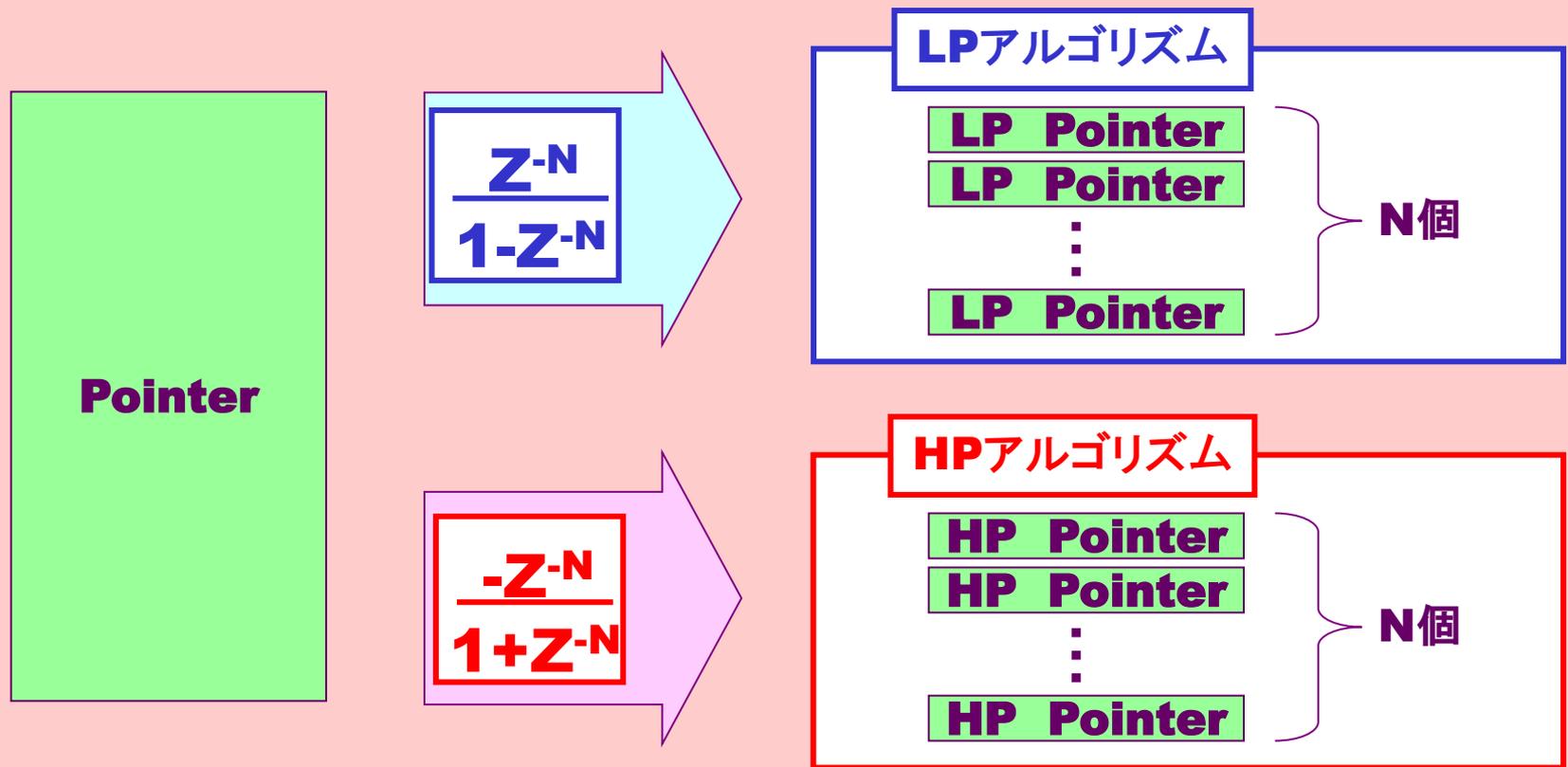
提案DWAアルゴリズムの効果を
シミュレーションで確認

DWA DAC



$\frac{-Z^{-N}}{1+Z^{-N}}$	$H(z)=1/(1+Z^{-1})$	$H(z)=1/(1-Z^{-1})$	$\frac{Z^{-N}}{1-Z^{-N}}$
	$H(z)=1/(1+Z^{-2})$	$H(z)=1/(1-Z^{-2})$	
	$H(z)=1/(1+Z^{-3})$	$H(z)=1/(1-Z^{-3})$	
	⋮	⋮	

DWAアルゴリズムを実現する Pointer



発表内容

- 研究目的
- マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- **マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
の応用**
- まとめ

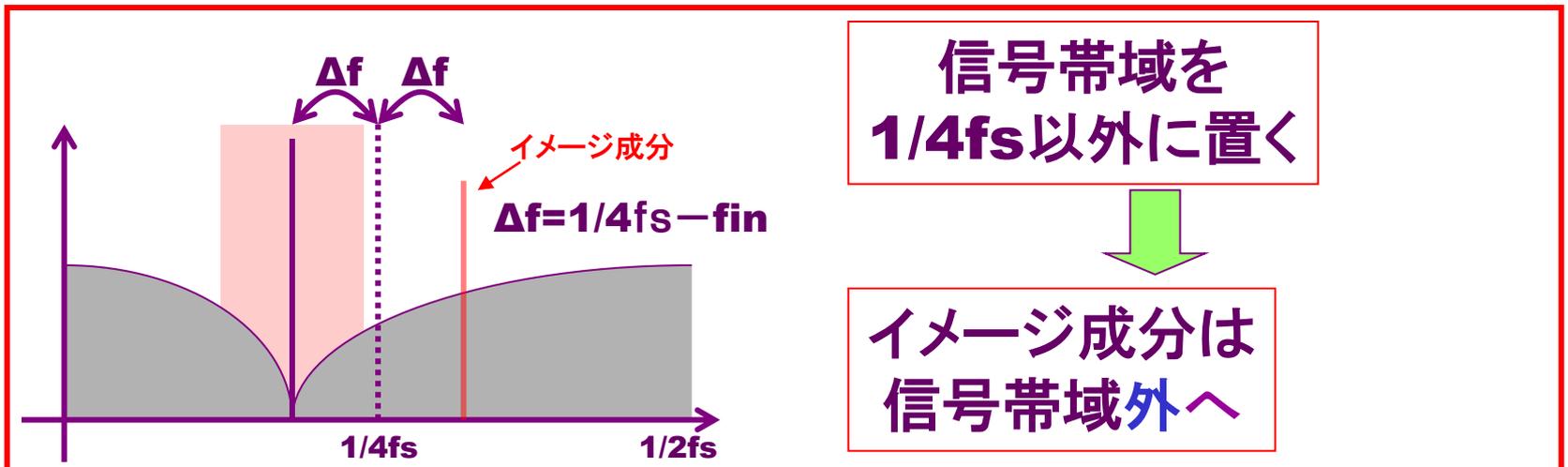
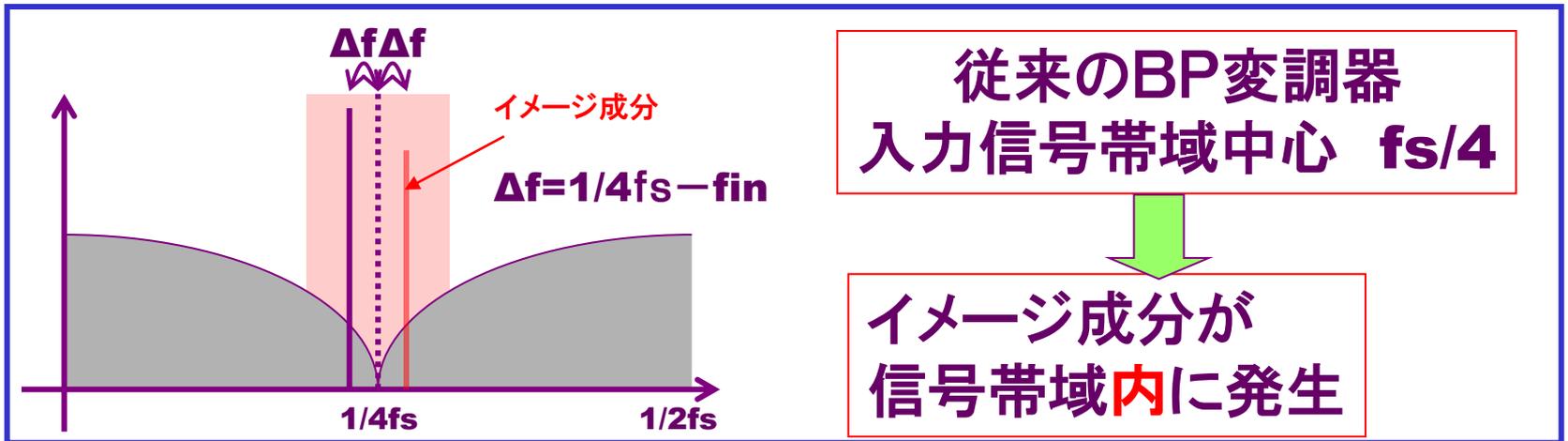
マルチバンドDWAアルゴリズム の応用 1

中心周波数 $f_s/6$ の

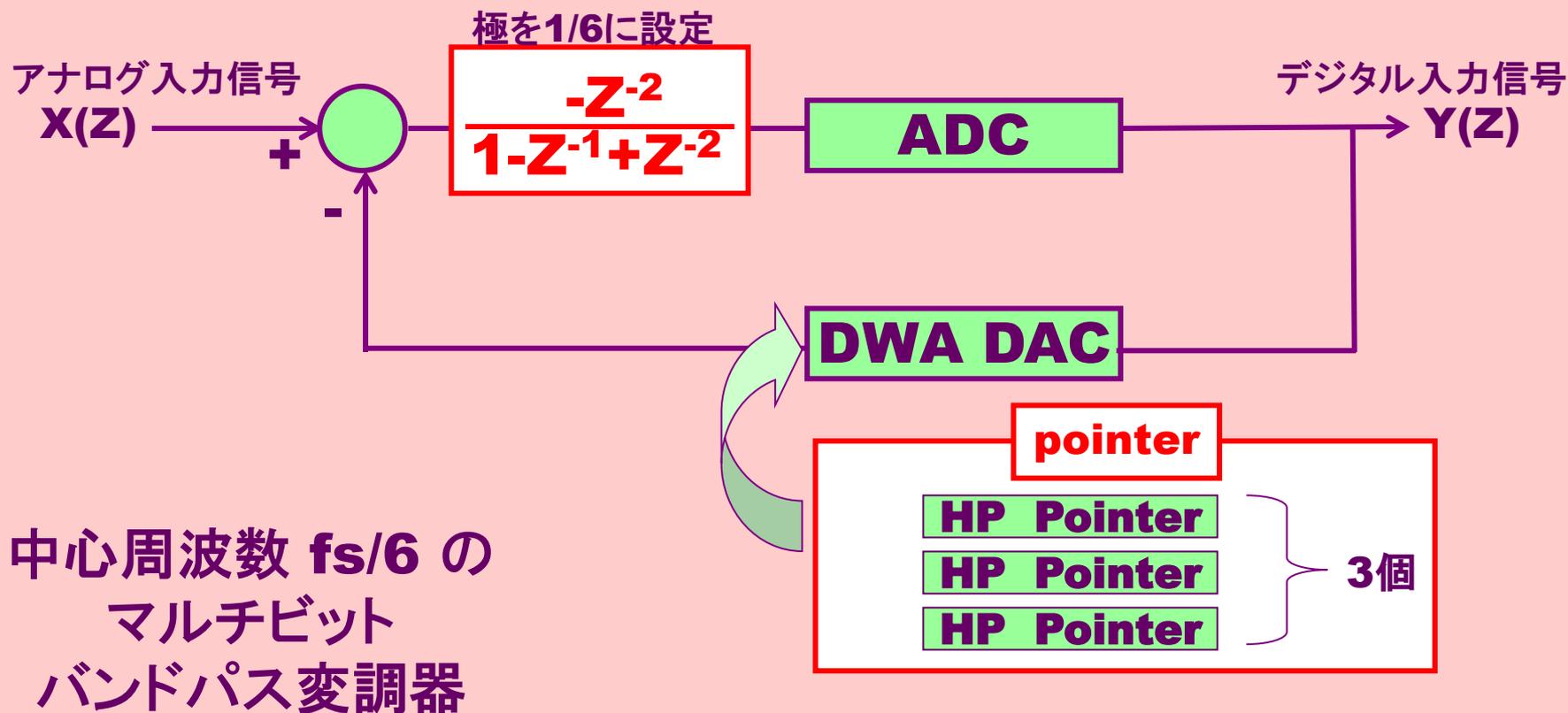
単一帯域 マルチビットバンドパス

$\Delta\Sigma$ AD変調器への応用

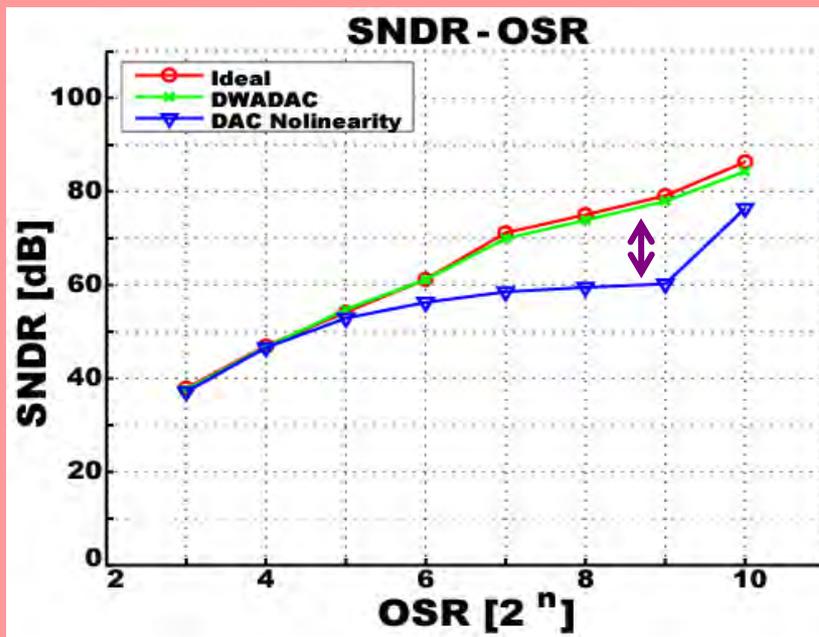
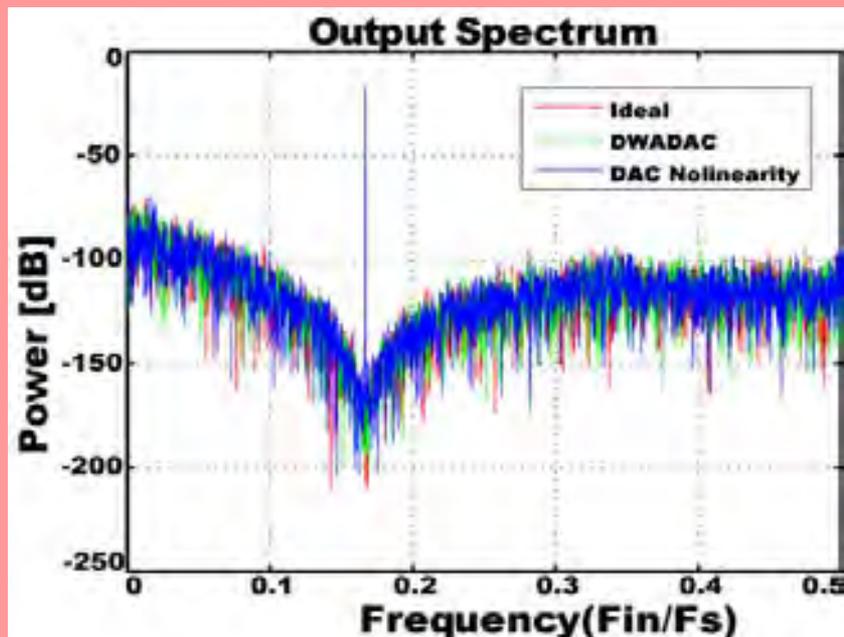
単一帯域のバンドパス変調器の イメージ回避



マルチバンドパス DWAを用いた バンドパス $\Delta\Sigma$ AD変調器の構成



シミュレーションによる DWAアルゴリズムの効果確認

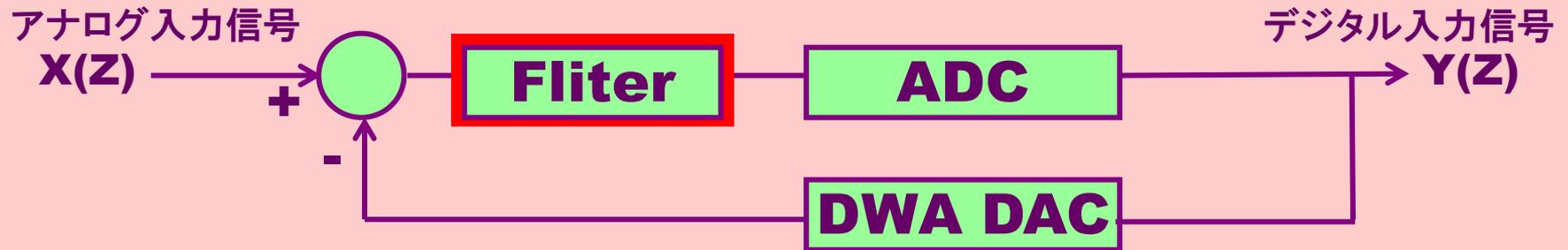


提案したマルチバンドパス用DWAアルゴリズムで
DAC非線形性によるSNDR劣化の影響を軽減

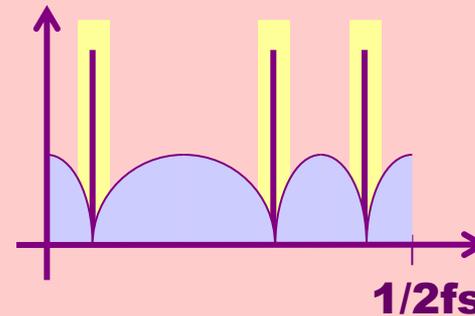
マルチバンドDWAアルゴリズム の応用 2

等間隔ではない複数帯域の
マルチビット・バンドパスAD変調器
への応用

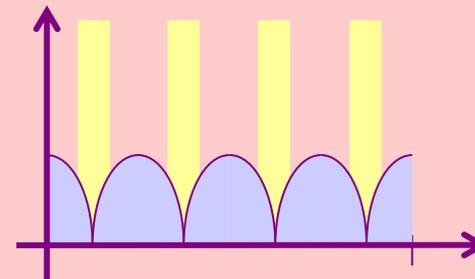
等間隔ではない複数帯域 マルチビット・バンドパスAD変調器



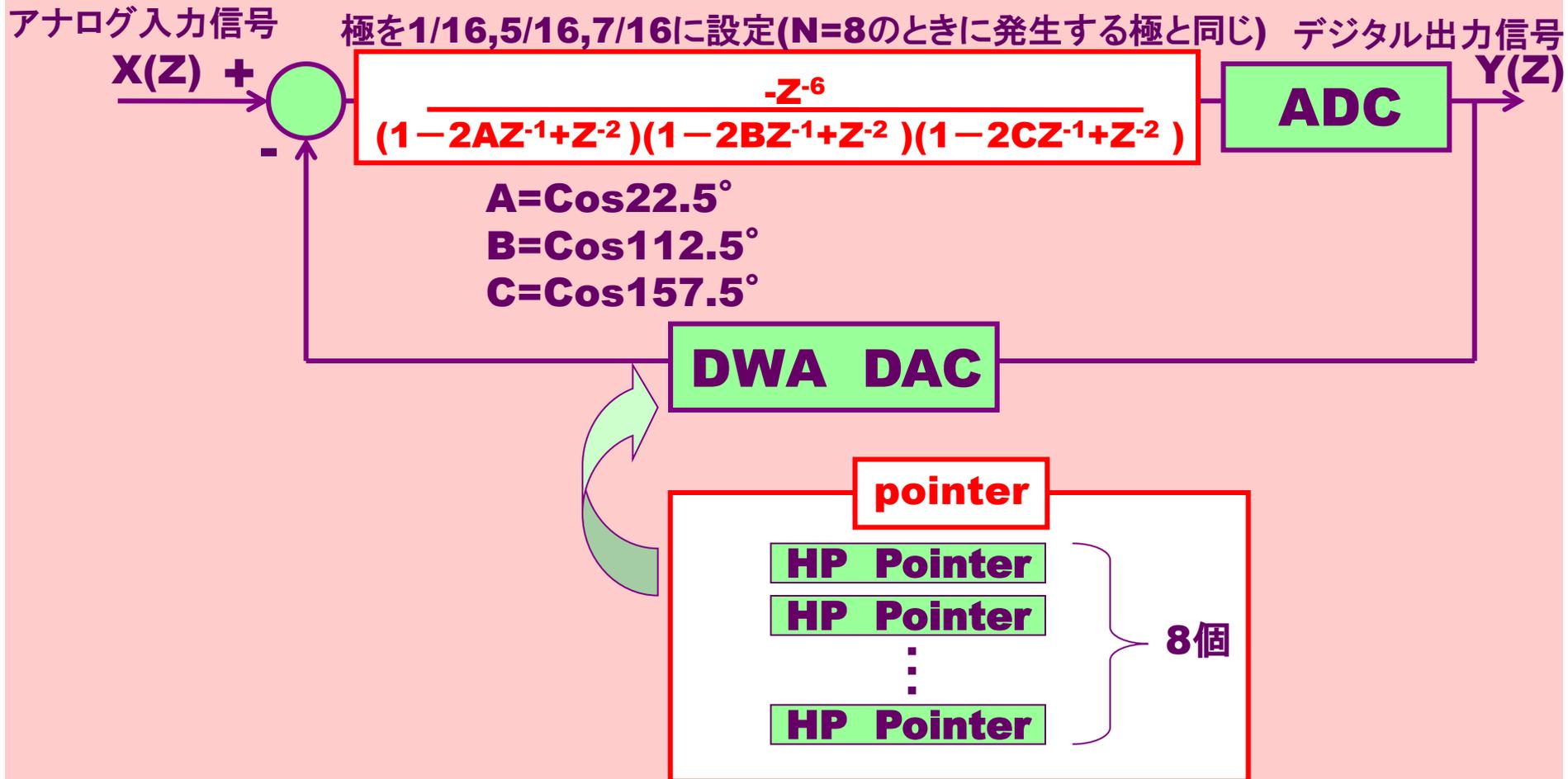
変調器出力



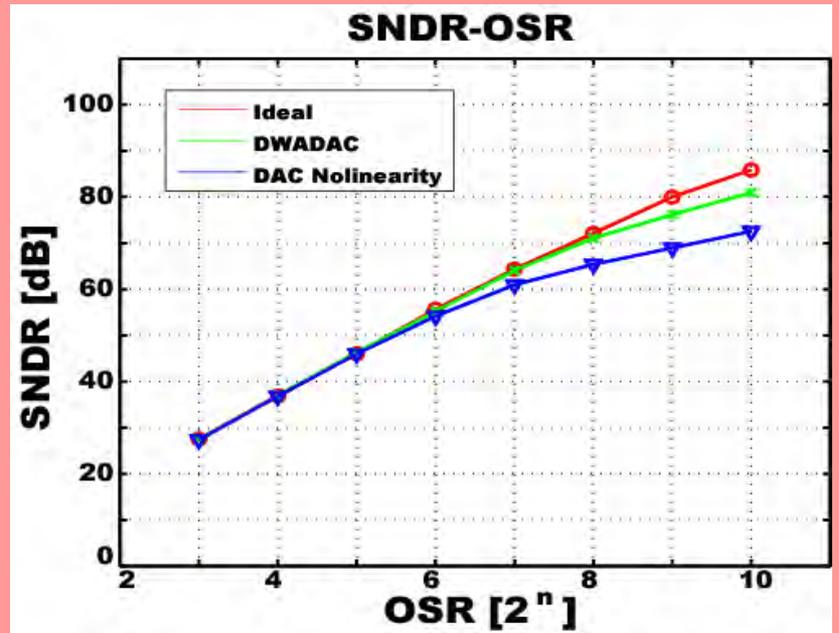
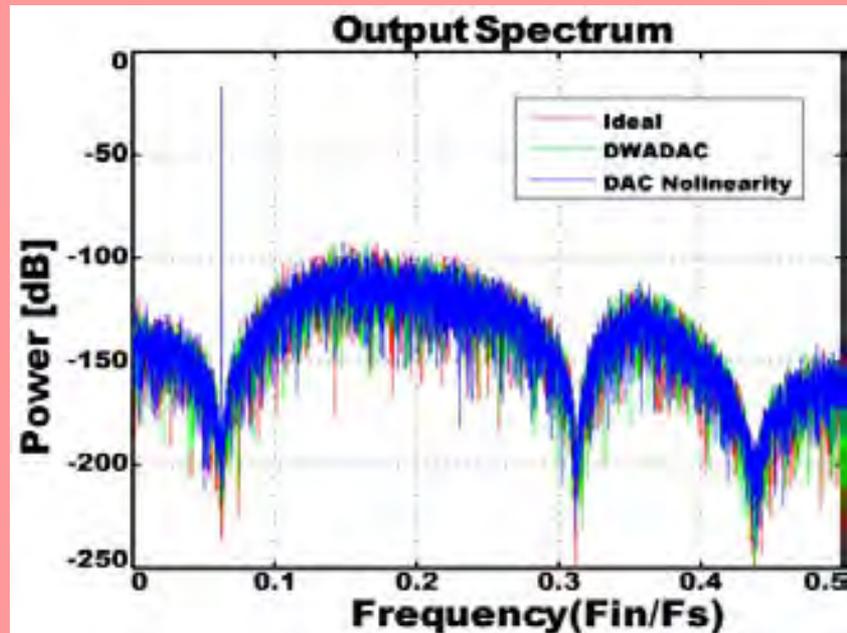
マルチバンドDWAによる
DAC非線形性
のノイズシェープ



等間隔ではない複数帯域 バンドパスAD変調器の構成



シミュレーションによる 提案DWAアルゴリズムの効果確認



提案したマルチバンドパス用DWAアルゴリズムで
DAC非線形性によるSNDR劣化の影響を軽減

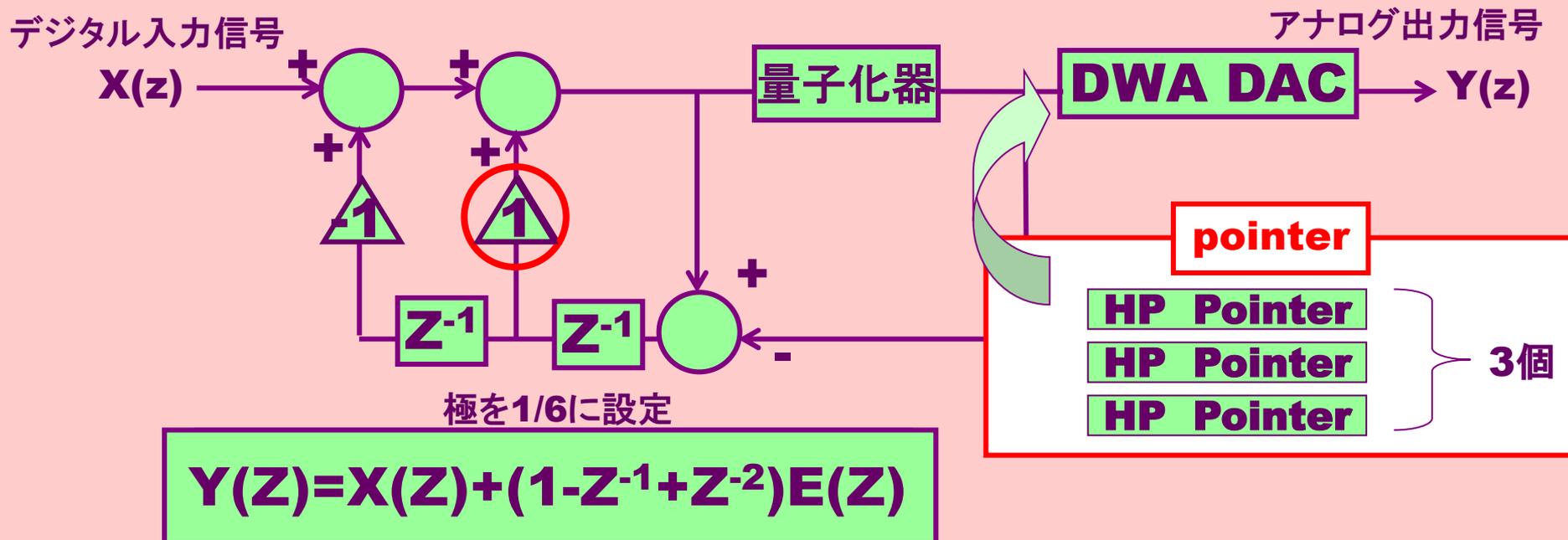
マルチバンドDWAアルゴリズム の応用 3

中心周波数 $f_s/6$ の

単一帯域 マルチビットバンドパス

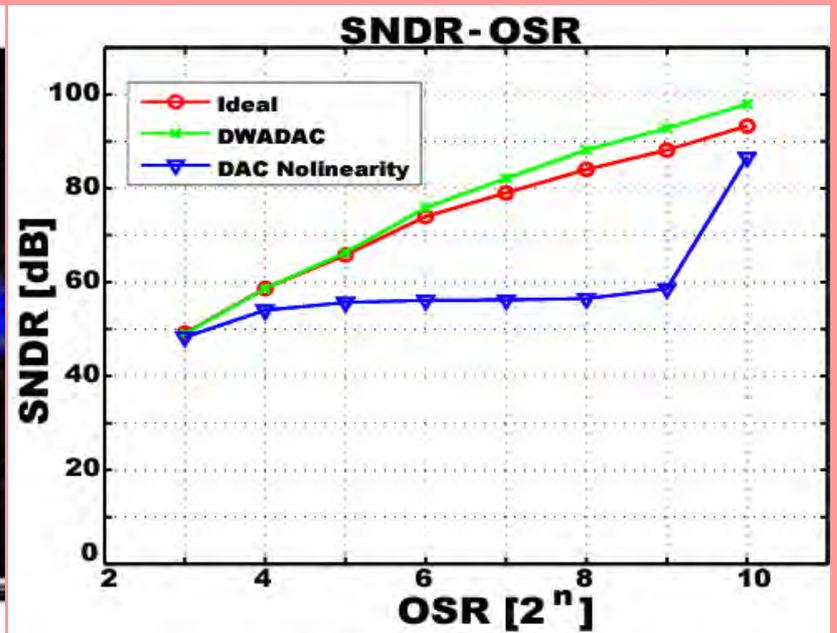
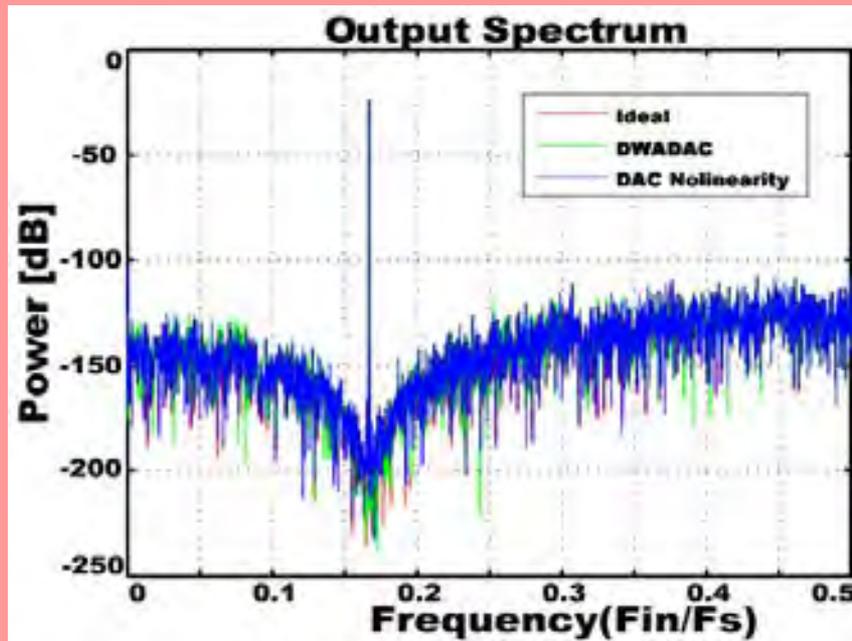
$\Delta\Sigma$ DA変調器への応用

中心周波数 $f_s/6$ の $\Delta\Sigma$ DA変調器



$\Delta\Sigma$ DAでは2段目のフィードバックゲインの調整で極の位置を可変にできる

シミュレーションによる 提案DWAアルゴリズムの効果確認



提案したマルチバンドパス用DWAアルゴリズムで
DAC非線形性によるSNDR劣化の影響を軽減

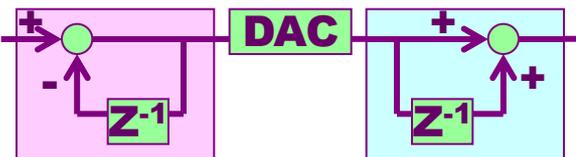
まとめ

- マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器の**DWA**アルゴリズムを提案した。
- マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器の利用例を提案した。

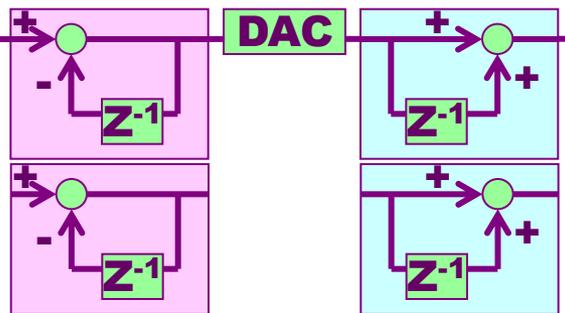
$$\frac{1 - z^{-N}}{1 + z^{-N}}$$

HP \Rightarrow BP \Rightarrow Multi BP

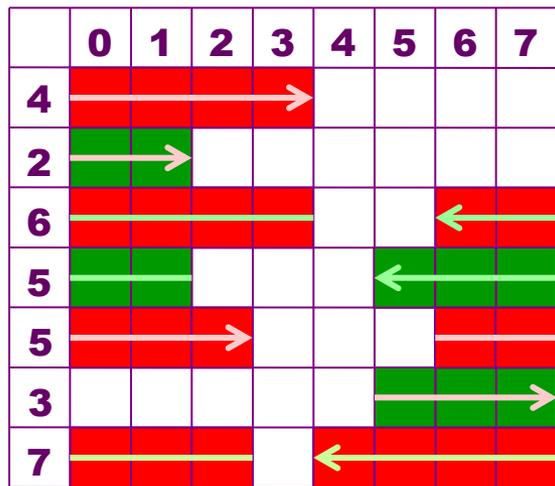
HP アルゴリズム



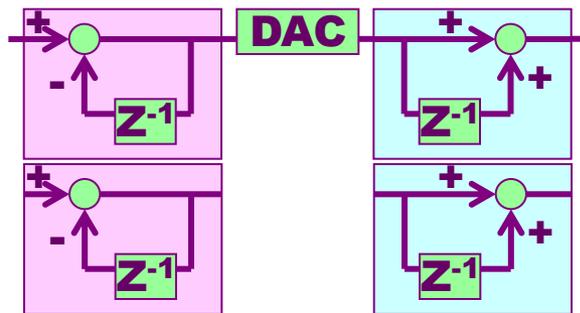
BP アルゴリズム



1回の出力ごとに切り替える



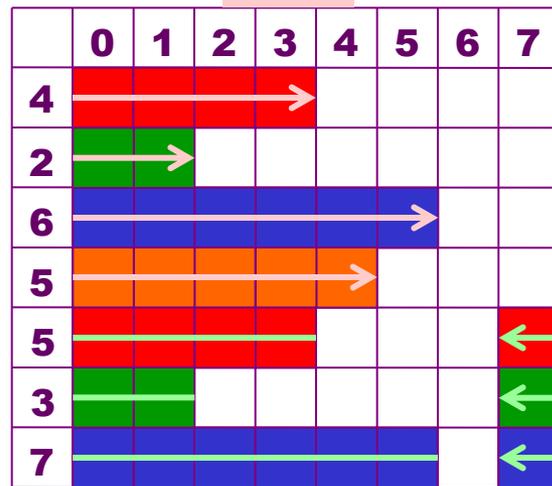
マルチBP アルゴリズム



⋮

N=4

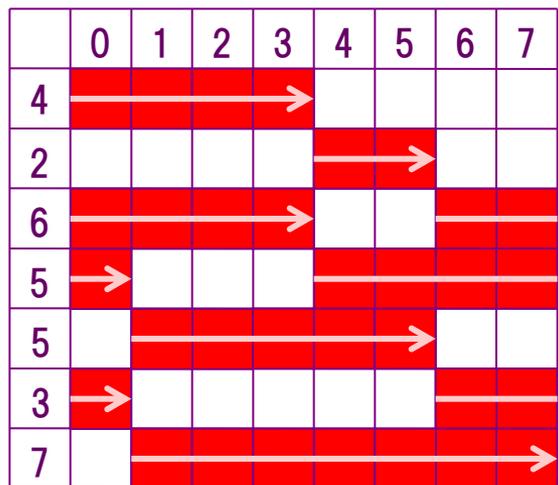
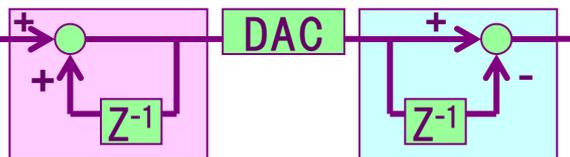
⋮



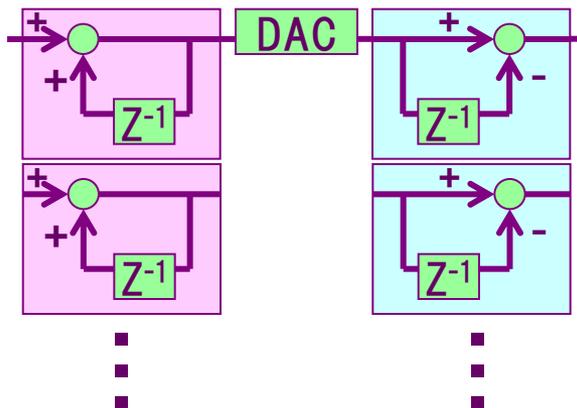
$$\frac{z^{-N}}{1-z^{-N}}$$

LP \Rightarrow Multi BP

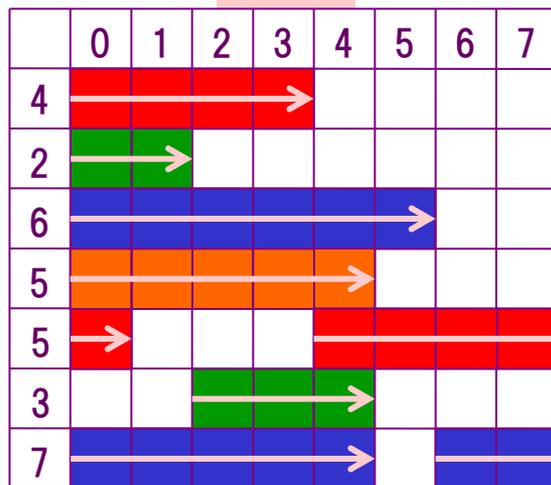
LPアルゴリズム



マルチBPアルゴリズム

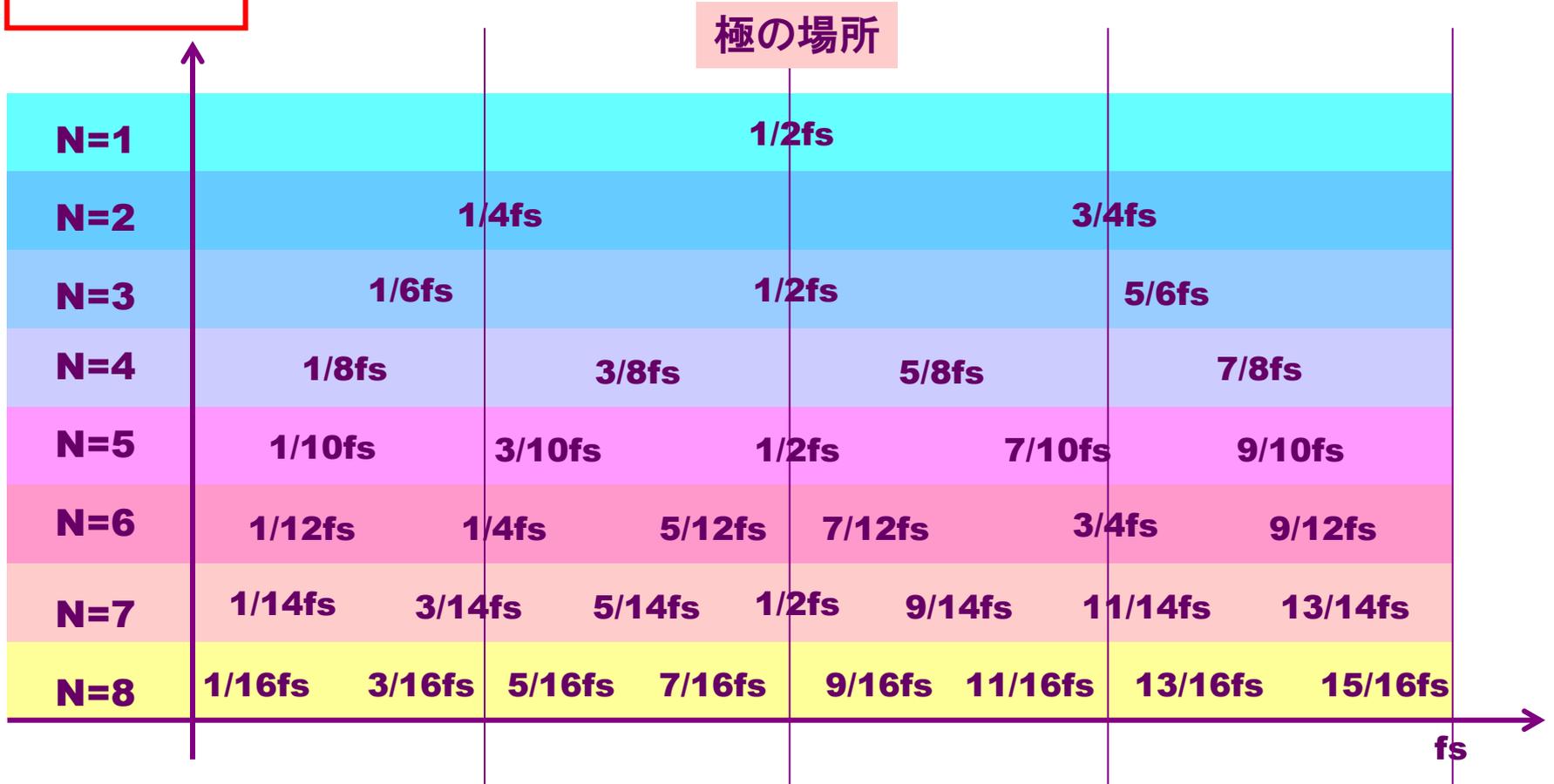


n=4



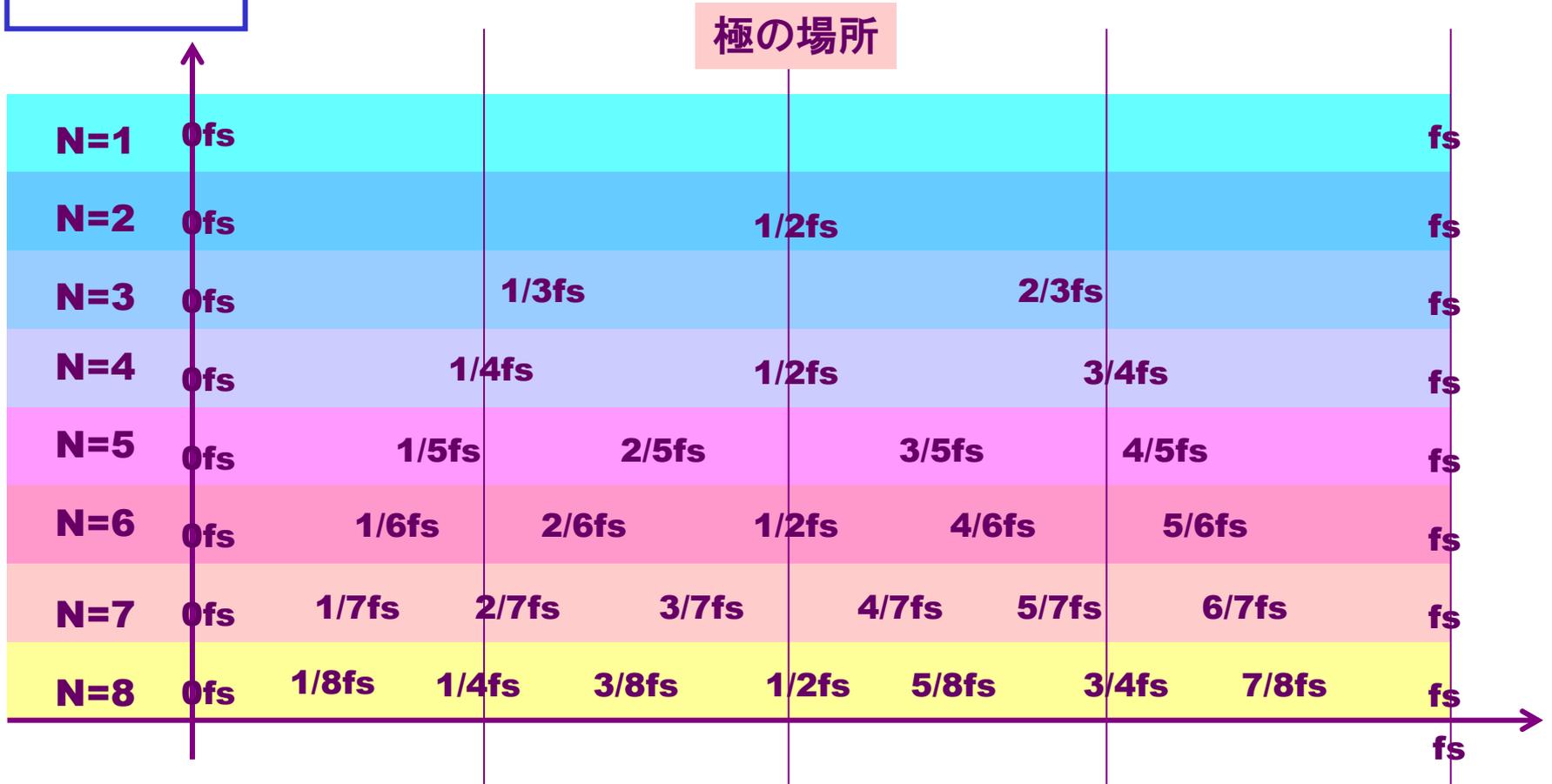
$$\frac{1 - Z^{-N}}{1 + Z^{-N}}$$

DWAの周波数特性

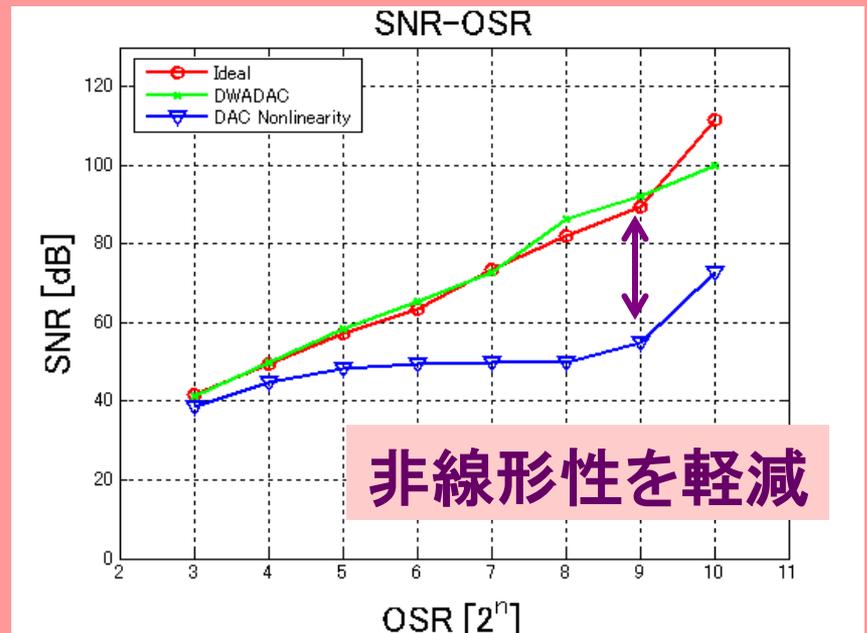
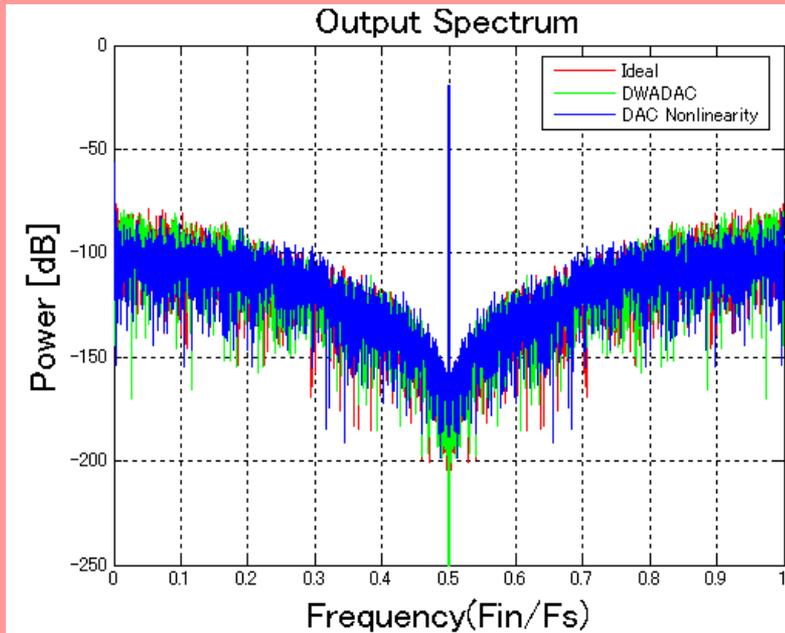


$$\frac{z^{-N}}{1-z^{-N}}$$

DWAの周波数特性



HPアルゴリズムの効果確認



$$\text{SNR}[\text{dB}] = 10 \cdot \log \frac{\text{Signal Power}}{\text{Noise Power}} = 10 \cdot \log \frac{V_{\text{Signal(rms)}}^2}{V_{\text{Noise(rms)}}^2} = 20 \cdot \log \frac{V_{\text{Signal(rms)}}}{V_{\text{Noise(rms)}}$$

S38-1 Data Converters II

15:45-16:15 PM

Nov. 2, 2018 (Fri)

Performance Improvement of Delta-Sigma ADC/DAC/TDC Using Digital Technique

Haruo Kobayashi

J.-L. Wei, M. Murakami, J. Kojima,
N. Kushita, Y. Du, J. Wang

Gunma University, Japan



Contents

- Objective of This Paper
- What is DWA ?
- LP, HP DWA
- Multi-Bandpass DWA
- Multi-Bandpass Complex DWA
- Second-Order DWA
- Application to Multi-bit $\Delta\Sigma$ TDC
- Conclusion

Contents

- Objective of This Paper
- What is DWA ?
- LP, HP DWA
- Multi-Bandpass DWA
- Multi-Bandpass Complex DWA
- Second-Order DWA
- Application to Multi-bit $\Delta\Sigma$ TDC
- Conclusion

Objective of This Paper

- Review the research results of authors' group

in the area of **DWA: Data Weighted Averaging** .

ADC/ DAC performance improvement
with simple digital techniques

- Consider their application to TDC
- Consider to unify the DWA algorithms and establish their design methodology.

Contents

- Objective of This Paper
- **What is DWA ?**
- LP, HP DWA
- Multi-Bandpass DWA
- Multi-Bandpass Complex DWA
- Second-Order DWA
- Application to Multi-bit $\Delta\Sigma$ TDC
- Conclusion

Calibration Techniques Classification

ADC/DAC/TDC digital calibration techniques
prevail in nano-CMOS era.

● Error Correction

- No measurement of errors
- Redundancy usage

● Self-Calibration

- Error measurement
- Compensation
- Reference

Voltage

Current

Time (frequency)

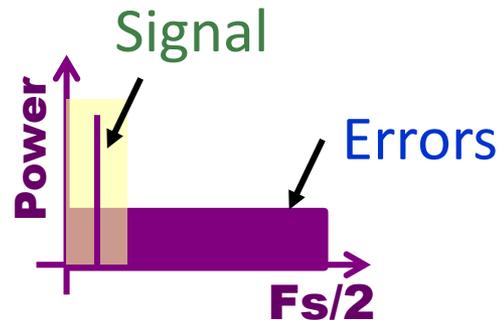
Linearity

DWA Techniques

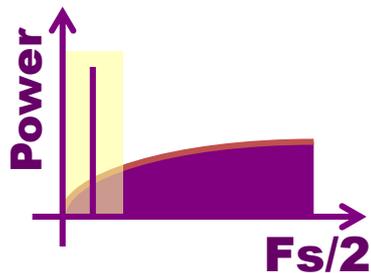
- Error Correction
 - No measurement of errors
 - Redundancy usage
 - Time averaging of errors
 - Spectrum shaping of errors

DWA: Data Weighted Averaging

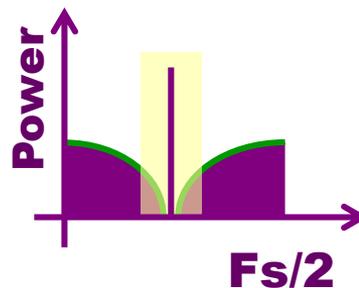
DEM: Dynamic Element Matching



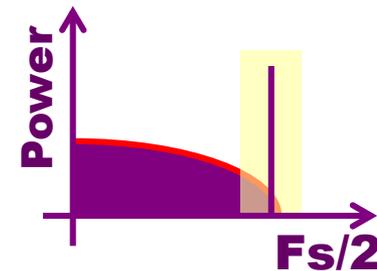
W/O DWA



LP DWA



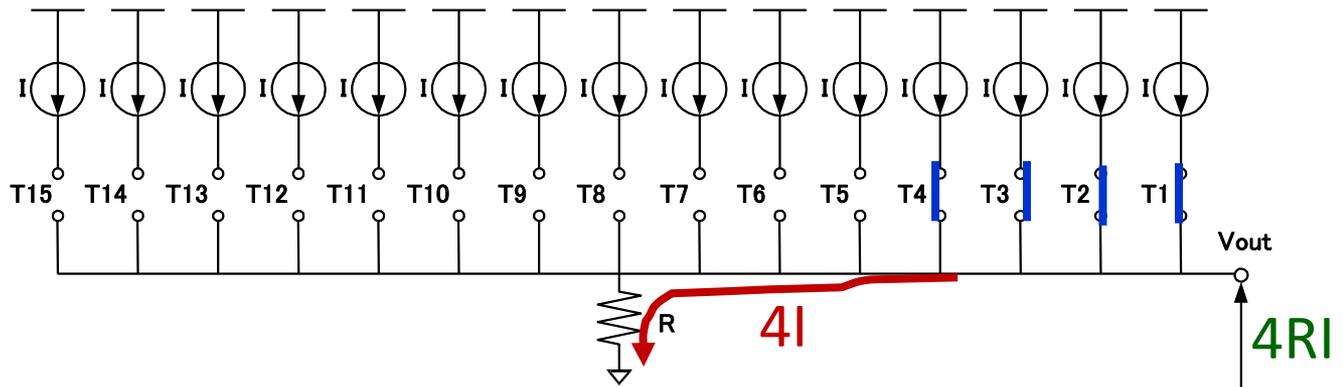
BP DWA



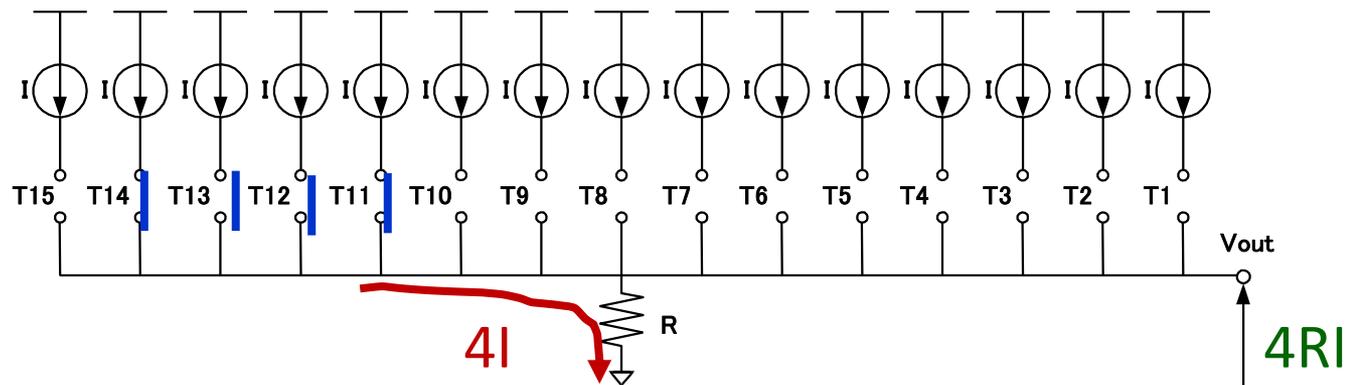
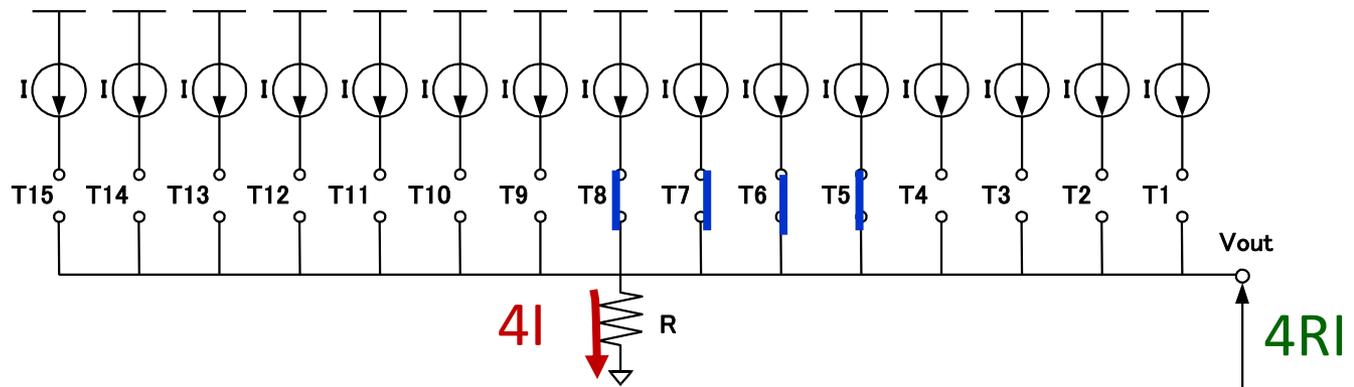
HP DWA

Segment DAC with Redundancy

Digital
input
= 4

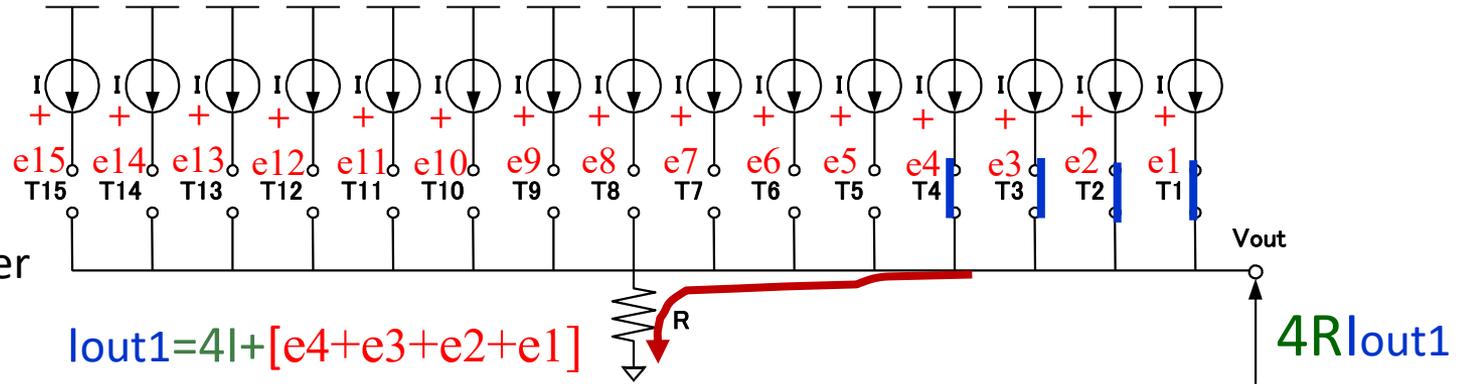


Multiple
realization
configurations



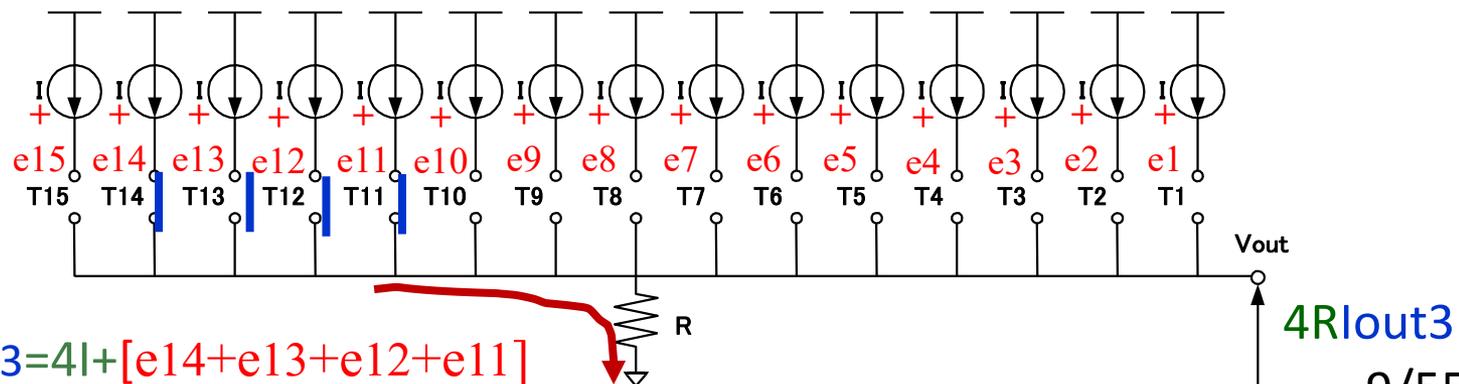
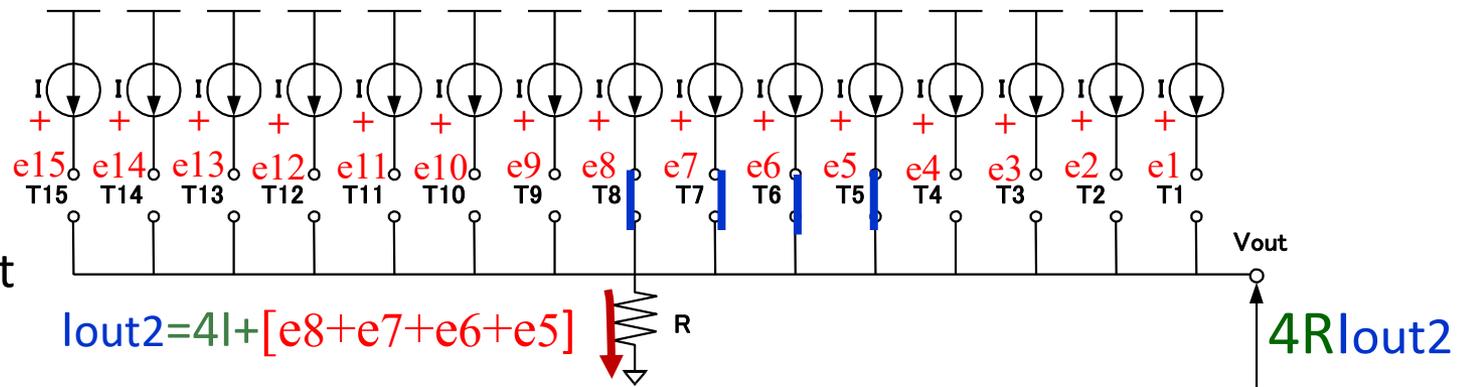
Unit Cell Mismatches

Current mismatches $e_{15}, e_{14}, \dots, e_1$ spectrum shaping by cell selection order

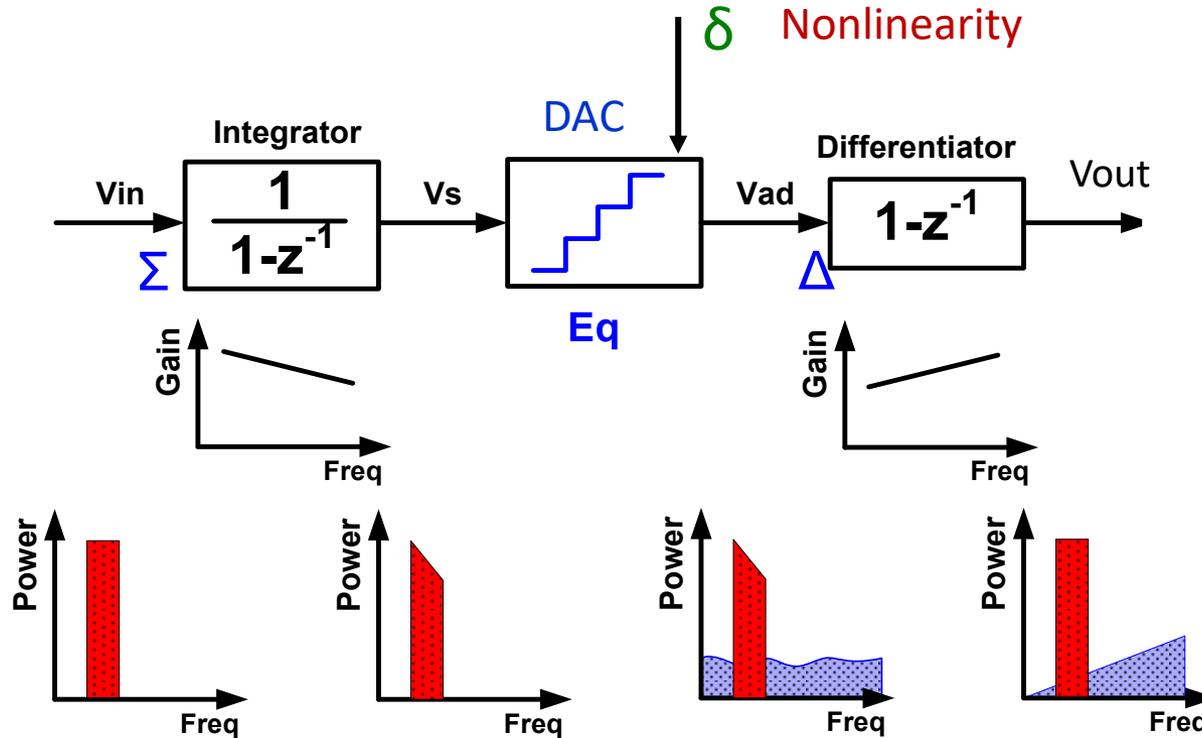


DWA algorithm

No measurement of $e_{15}, e_{14}, \dots, e_1$



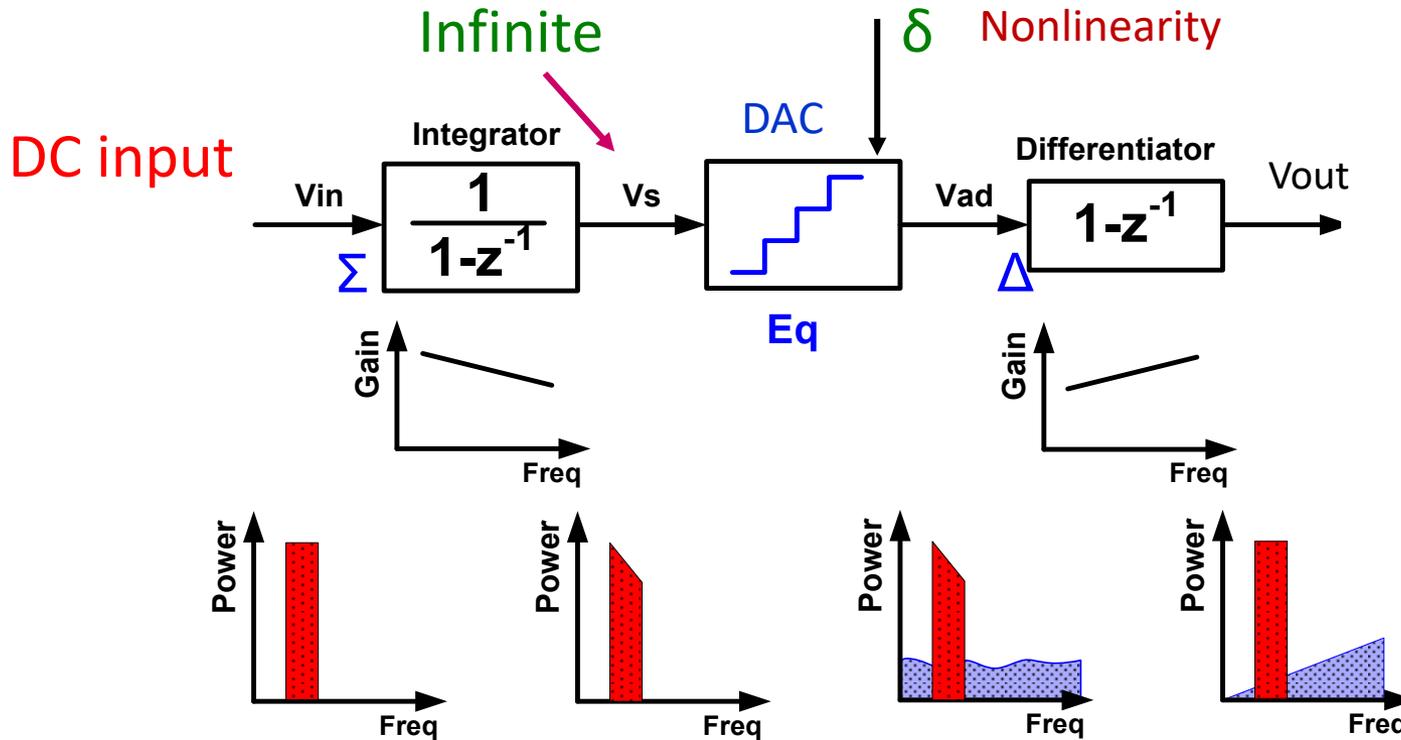
$\Delta\Sigma$ Modulation and DWA



$$V_{out}(z) = V_{in}(z) + (1 - z^{-1}) \cdot (z)$$

DAC nonlinearity (z) is first-order noise-shaped.

$\Delta\Sigma$ Modulation and DWA



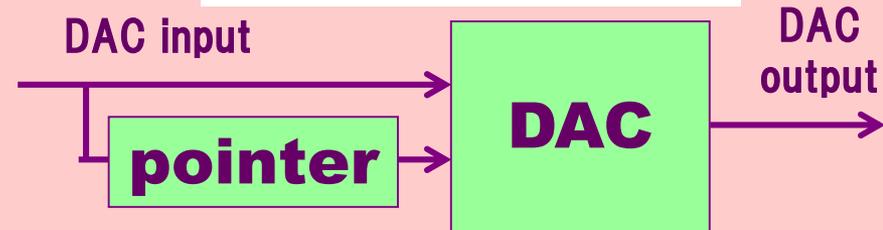
This configuration can NOT be implemented !

Equivalent Operation Using DWA to $\Delta\Sigma$ Modulation

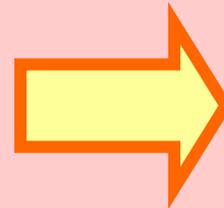
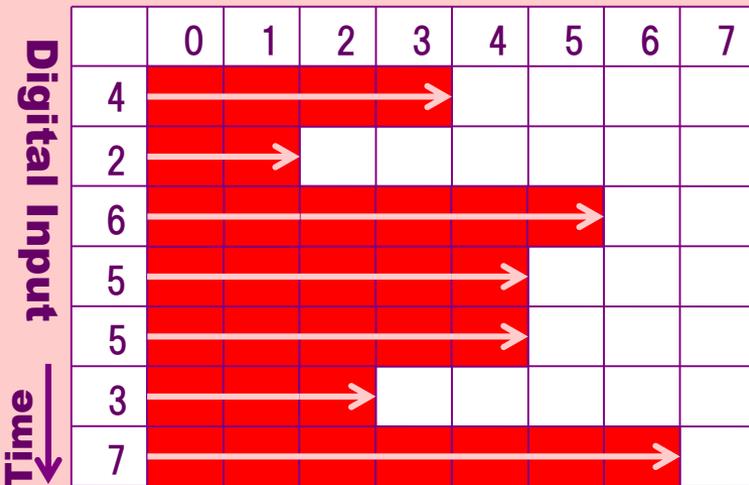
Normal DAC



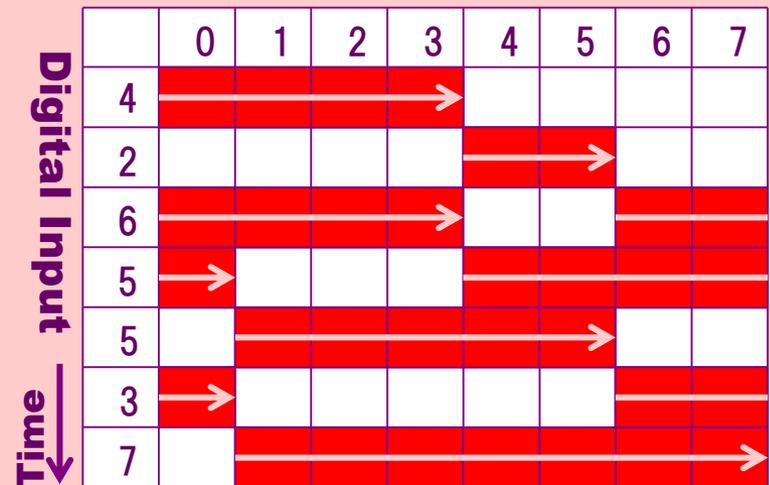
DWA DAC



Current Cell

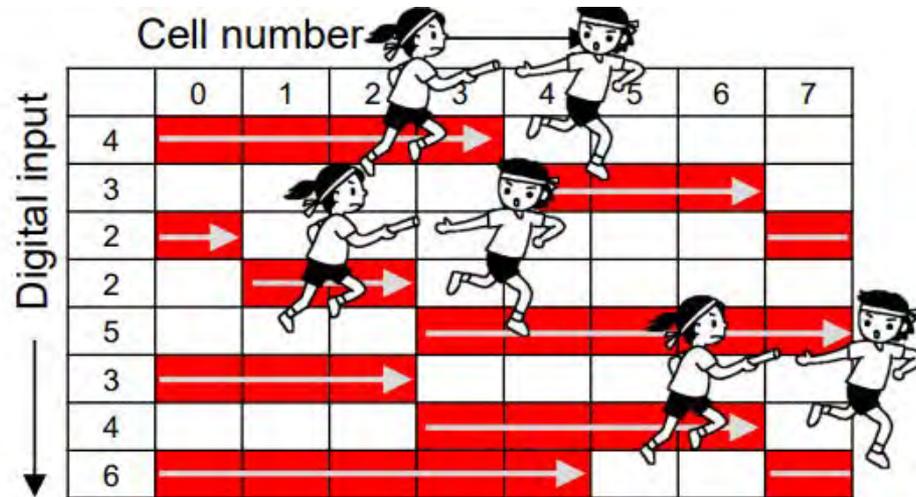


Current Cell



“Infinite” is equivalently realized with wrap-around

DWA Operation is a fun !



Passing a baton in relay race !



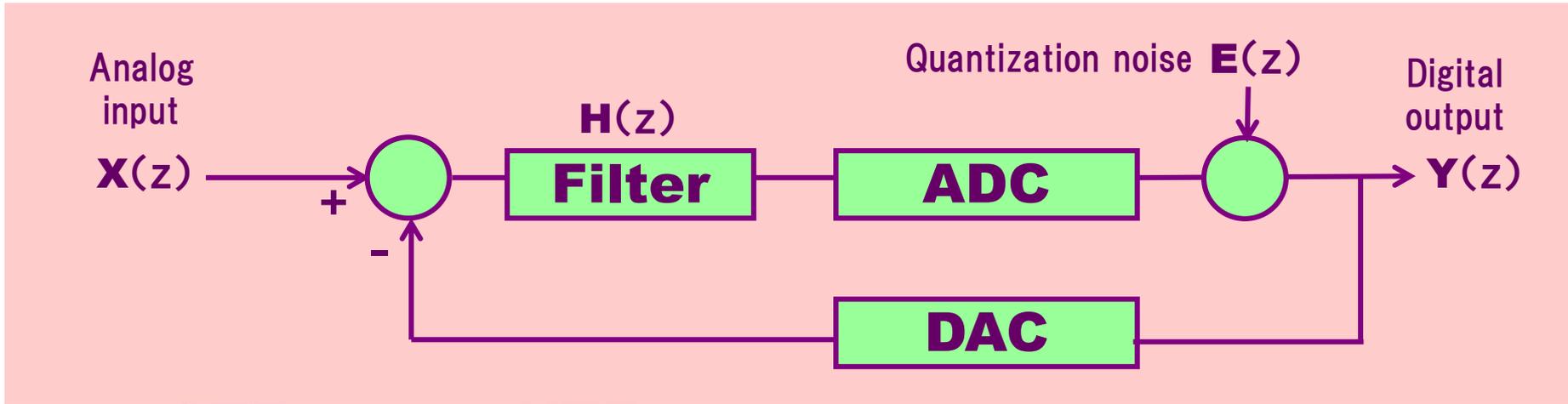
Contents

- Objective of This Presentation
- What is DWA ?
- **LP, HP DWA**
- Multi-Bandpass DWA
- Multi-Bandpass Complex DWA
- Second-Order DWA
- Application to Multi-bit $\Delta\Sigma$ TDC
- Conclusion

LP: Low Pass

HP: High Pass

LP $\Delta\Sigma$ AD Modulator

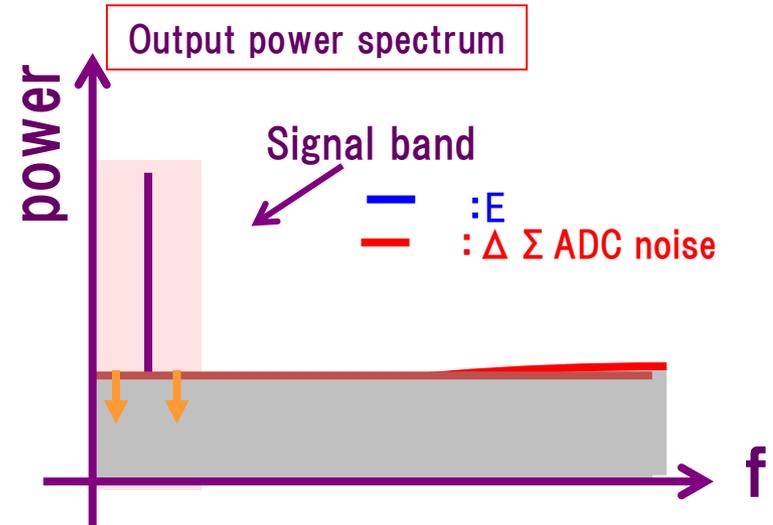


STF

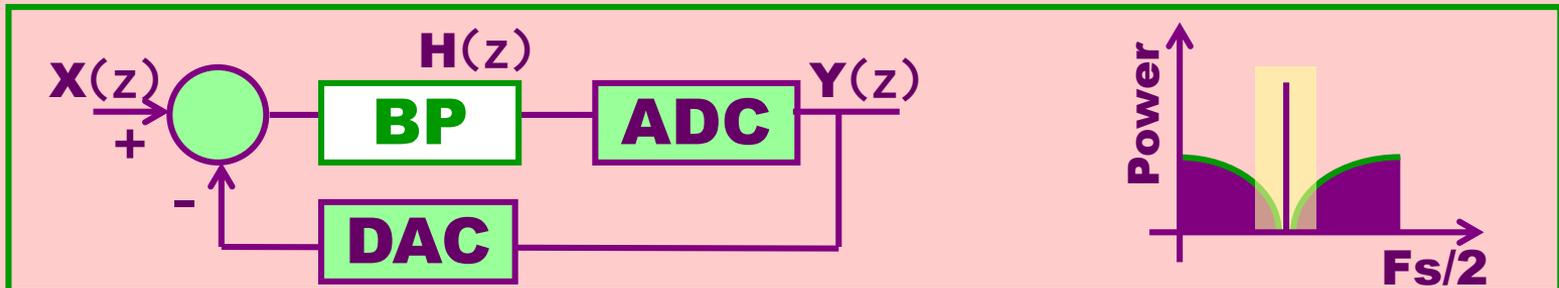
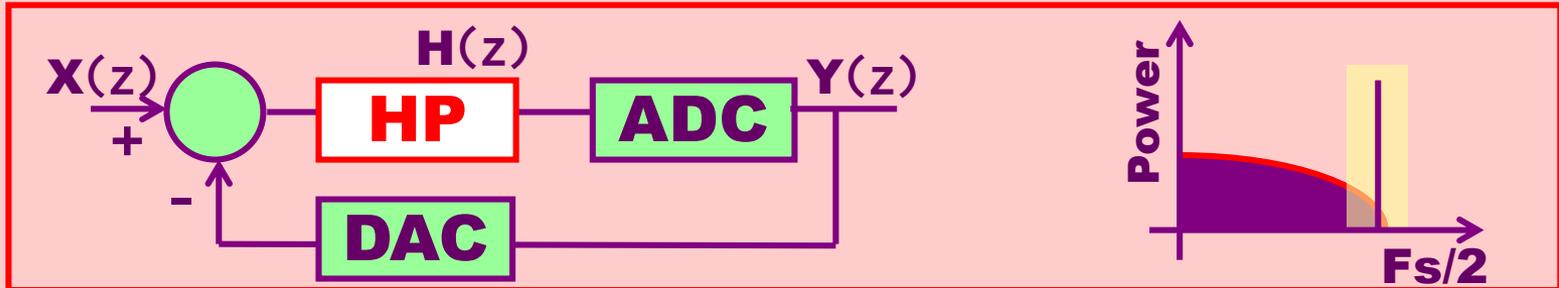
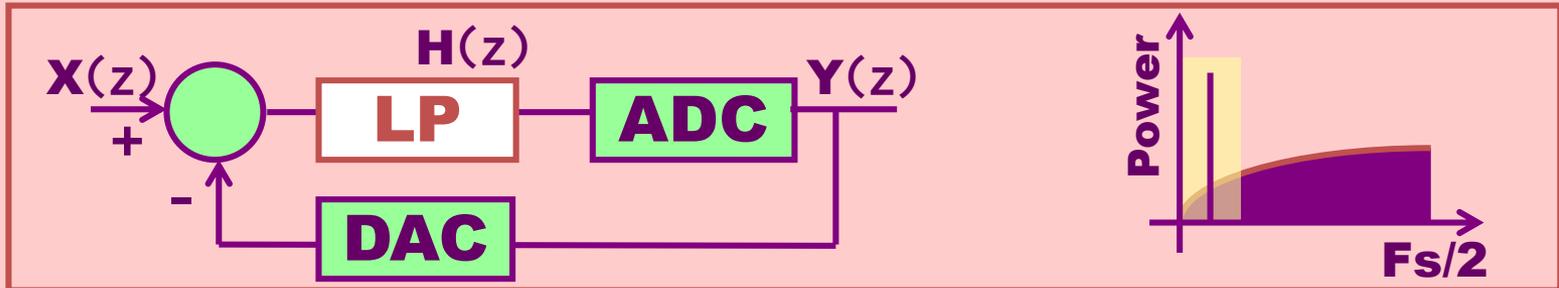
NTF

$$Y(z) = \frac{H(z)}{1+H(z)} X(z) + \frac{1}{1+H(z)} E(z)$$

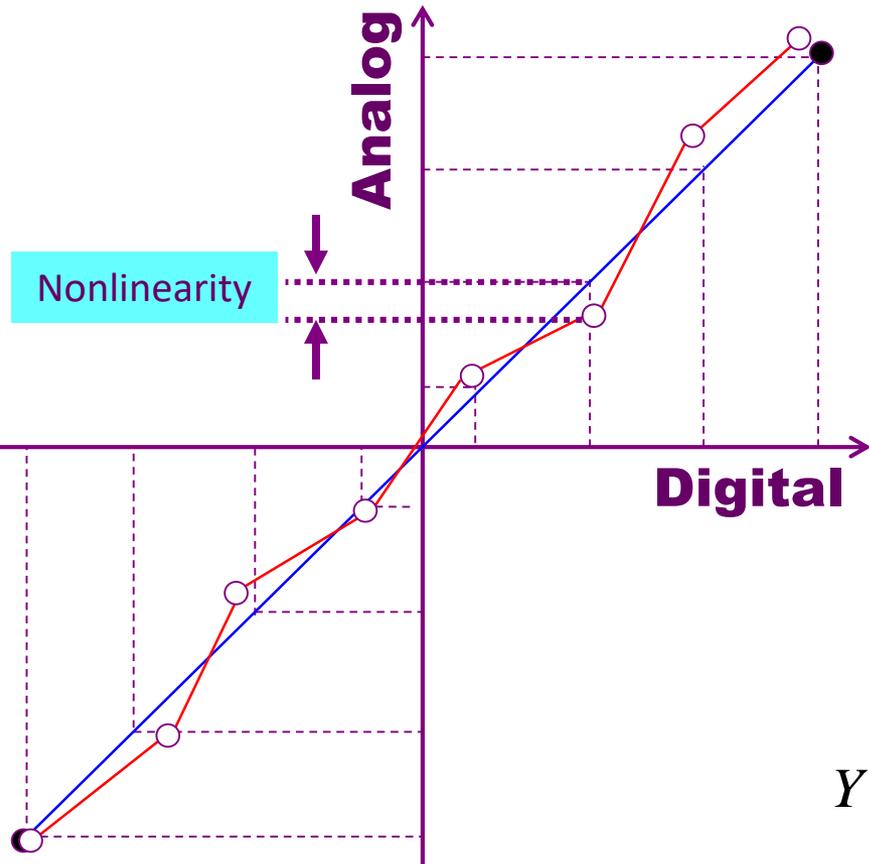
↓
↓
1
0



Varieties of $\Delta\Sigma$ AD Modulators

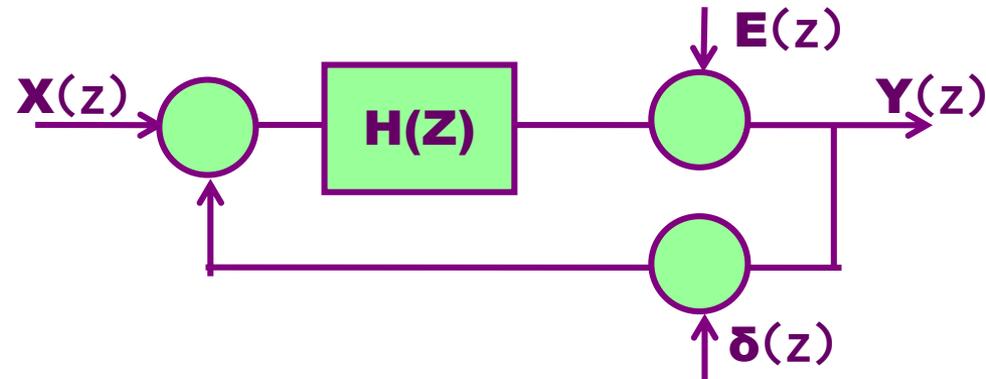
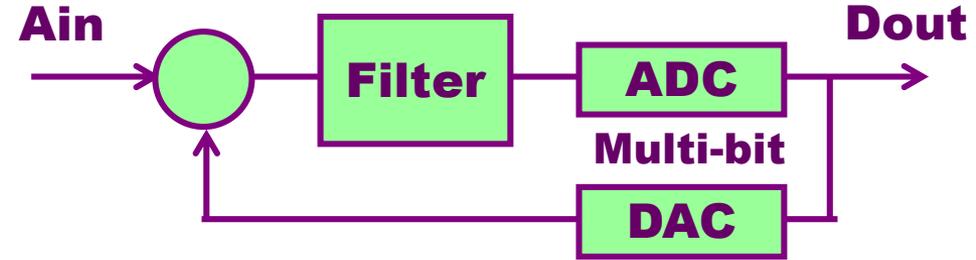


Multi-bit DAC Nonlinearity



● :Single-bit Output

○ :Multi-bit Output

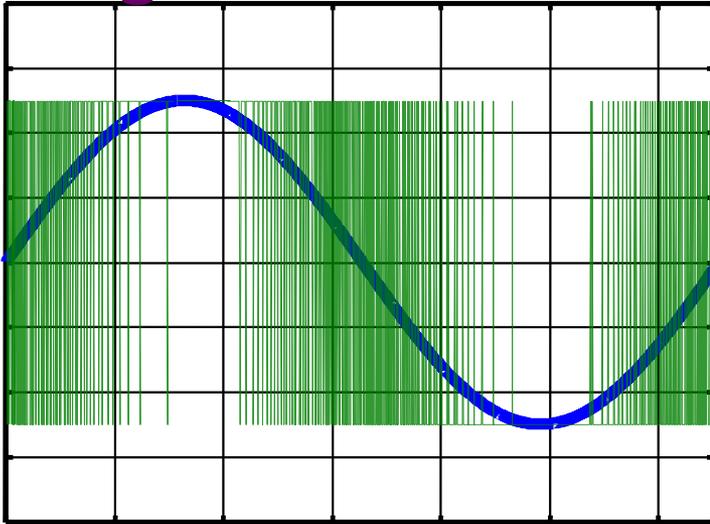


$$Y(z) = \frac{H(z)}{1 + H(z)} \{X(z) - \delta(z)\} + \frac{1}{1 + H(z)} E(z)$$

$\delta(z)$ is NOT noise-shaped

Why Multi-bit ADC/DAC inside $\Delta\Sigma$ AD Modulator ?

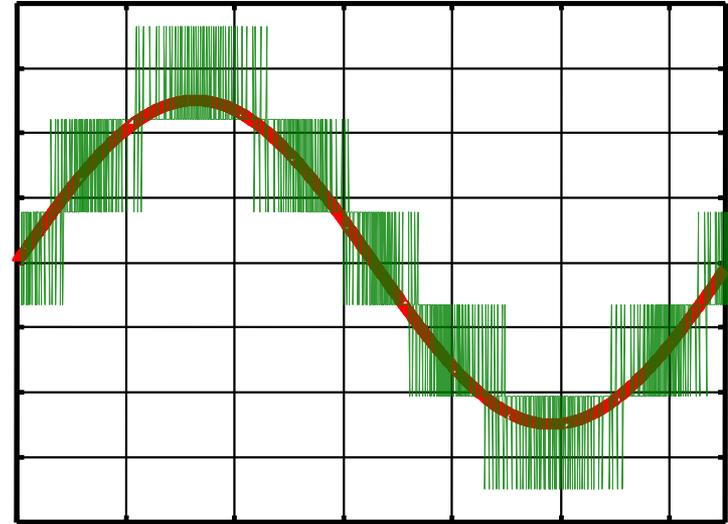
Single-Bit



- High slew-rate of opamp

⇒ Large power

Multi-Bit



- Low slew-rate of opamp

⇒ Small power

- Problem:

Multi-bit DAC nonlinearity

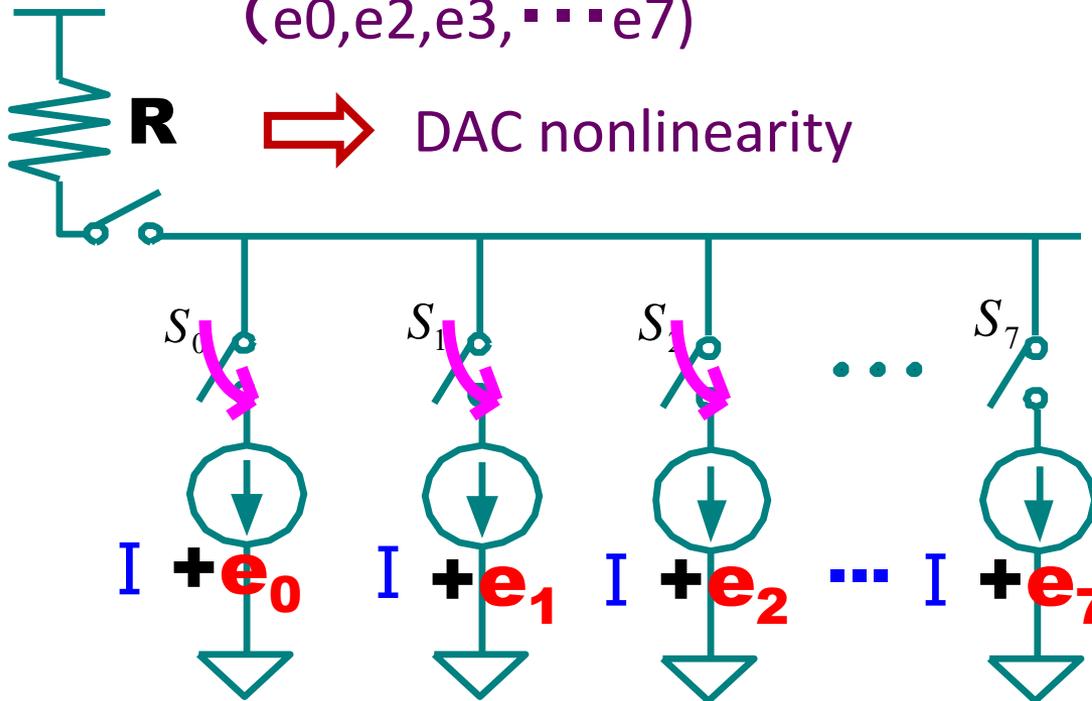
Unit Cell Mismatches

Segment DAC

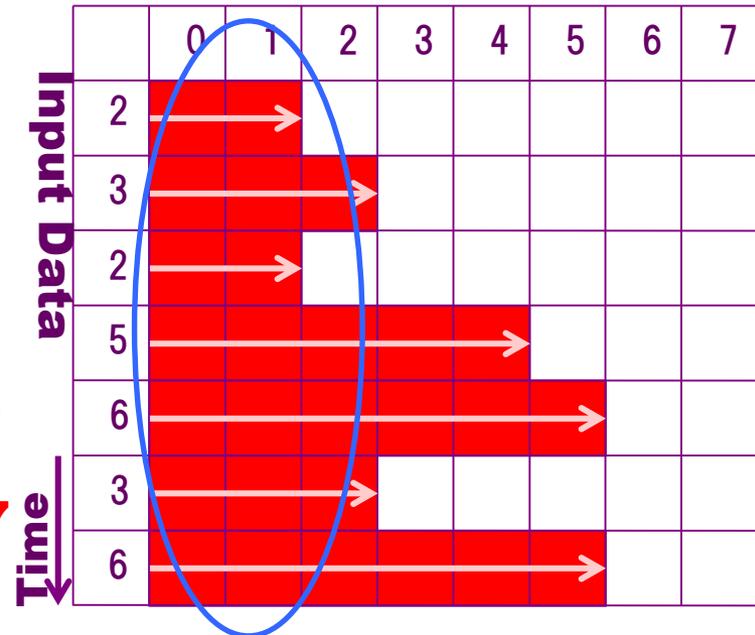


Current Cell Mismatch
($e_0, e_2, e_3, \dots, e_7$)

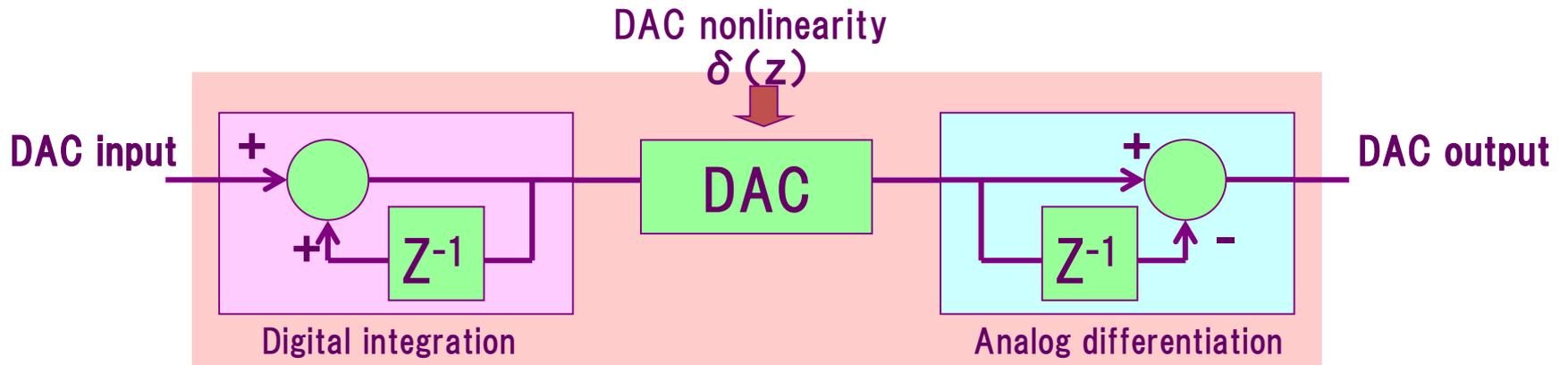
Errors of specific current cells
are accumulated



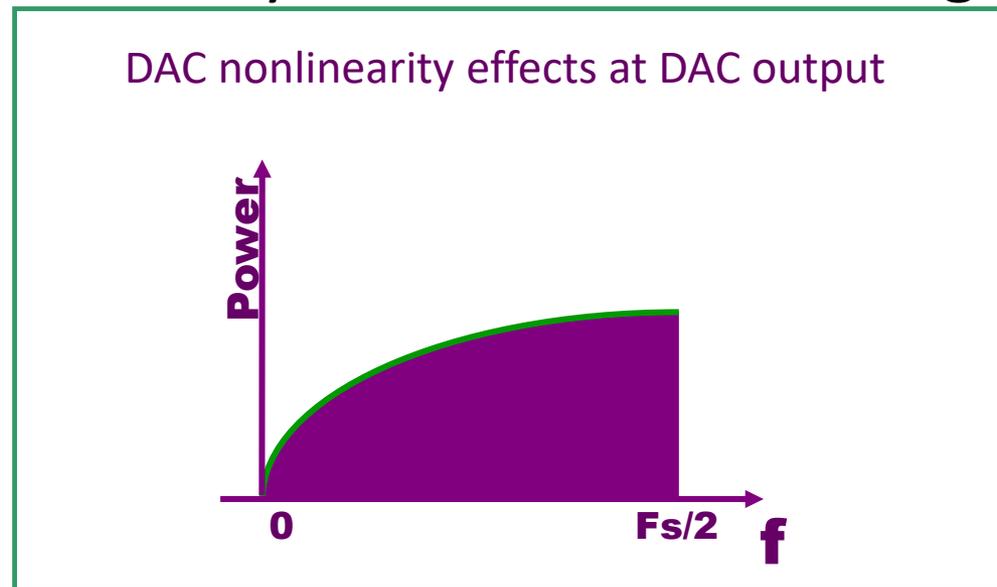
Current Cell



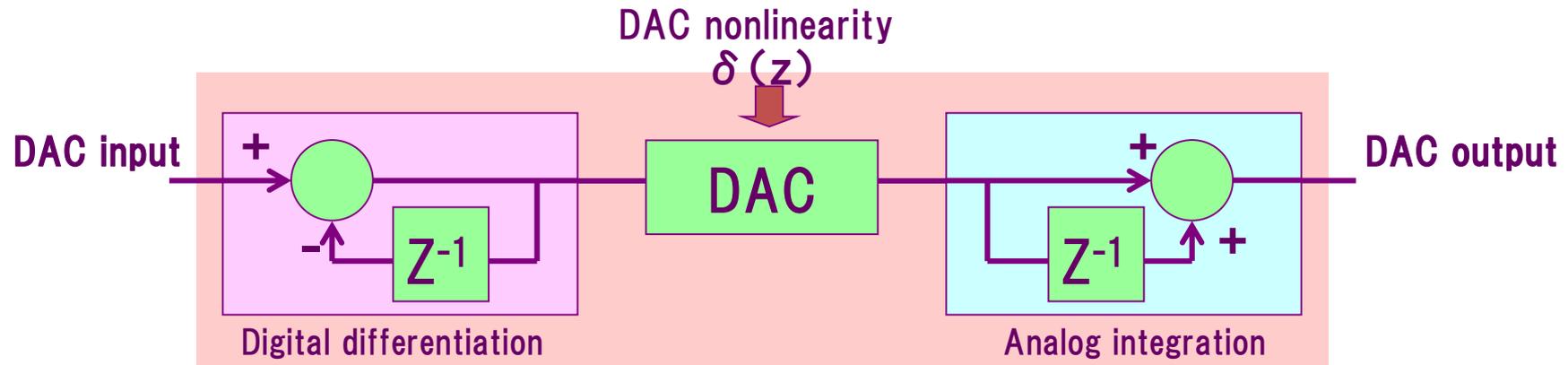
Equivalent LP DWA Algorithm



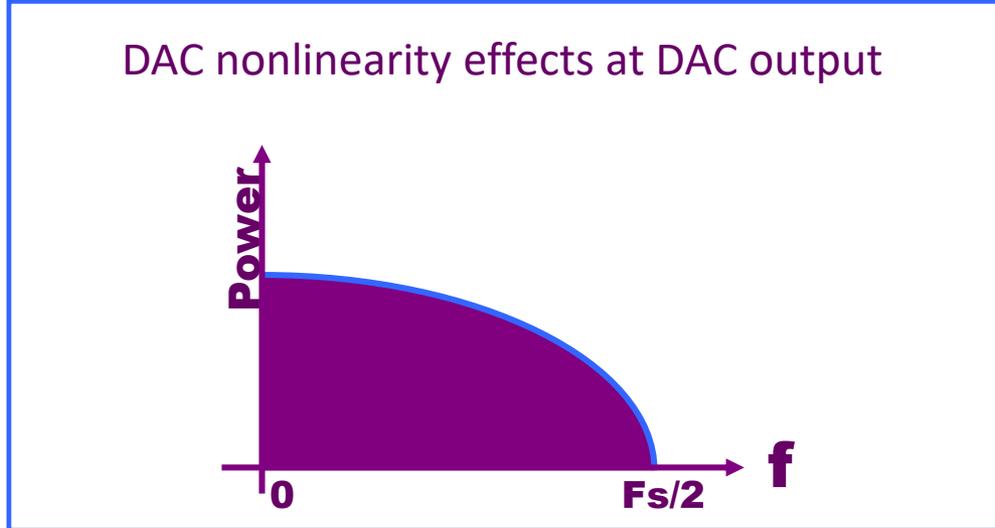
- Signal \rightarrow Integration \times Differentiation = Flat
- DAC Nonlinearity \rightarrow Differentiation (High Pass)



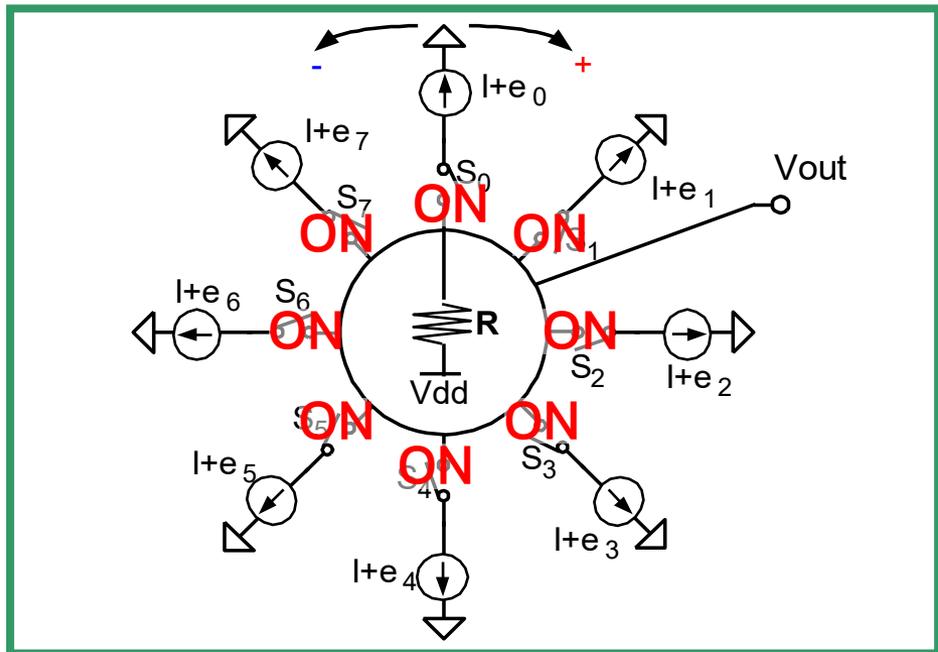
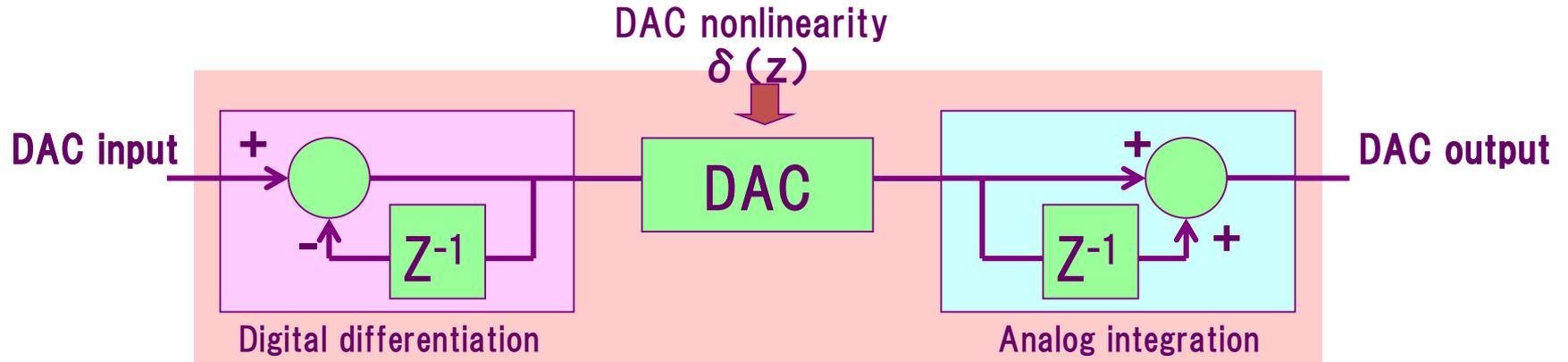
Let's Consider HP DWA Algorithm



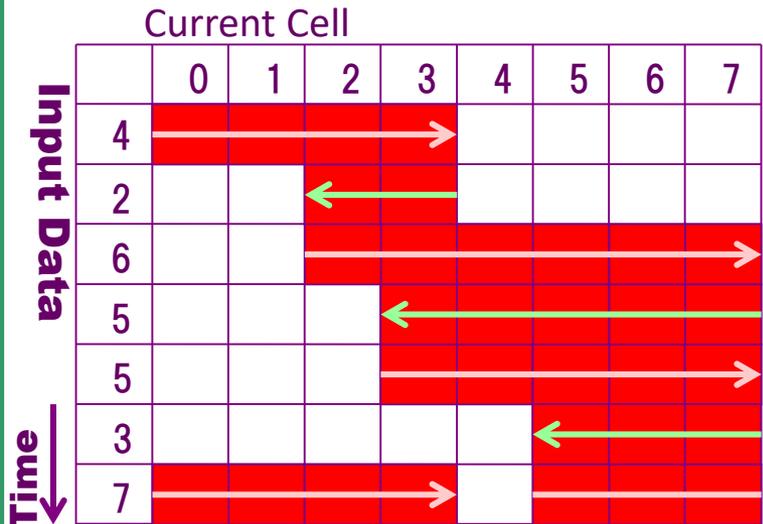
- Signal \rightarrow Differentiation \times Integration = Flat
- DAC Nonlinearity \rightarrow Integration (Low Pass)



HP DWA Algorithm Realization



$$H(z) = 1 / (1 + Z^{-1})$$



Back and forth

Contents

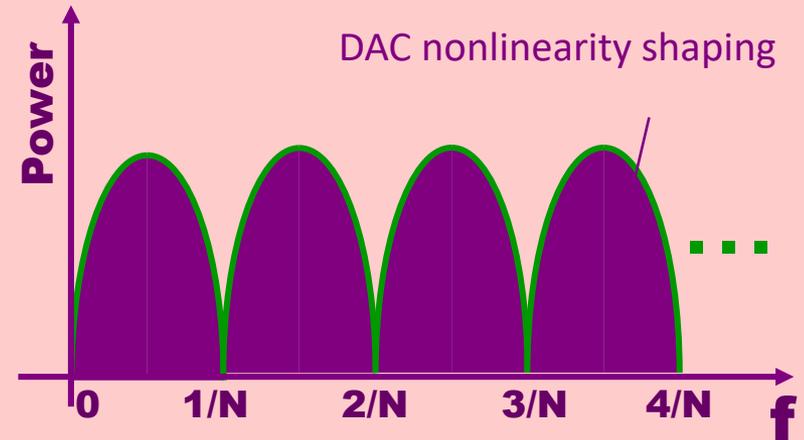
- Objective of This Presentation
- What is DWA ?
- LP, HP DWA
- **Multi-Bandpass DWA**
- Multi-Bandpass Complex DWA
- Second-Order DWA
- Application to Multi-bit $\Delta\Sigma$ TDC
- Conclusion

[1] A. Motozawa, H. Kobayashi, et. al.,
"Multi-BP $\Delta\Sigma$ Modulation Techniques and Their Applications",
IEICE Tran, J90-C(Feb. 2007).

Multi-Bandpass DWA

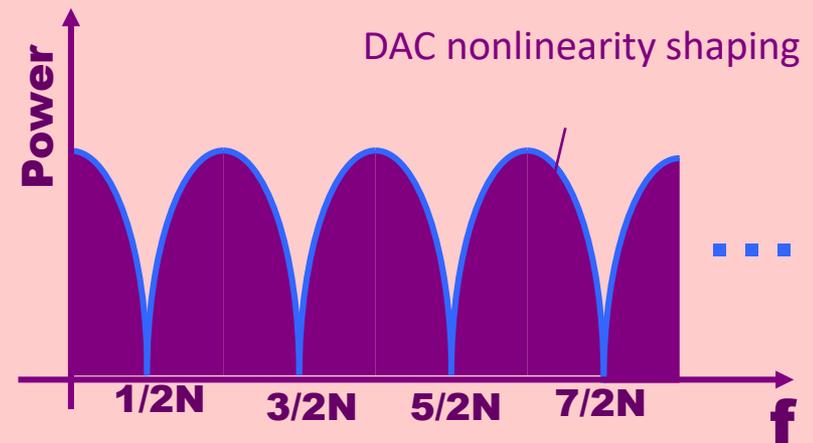
Type I DWA

- **N** pointers
- **N**-channel interleave of **LP** DWA algorithm



Type II DWA

- **N** pointers
- **N**-channel interleave of **HP** DWA algorithm



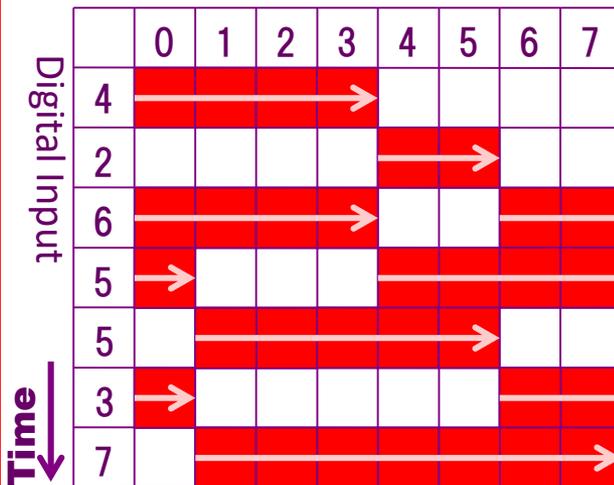
LP ^{Type I} ⇒ Multi-BP

LP Algorithm



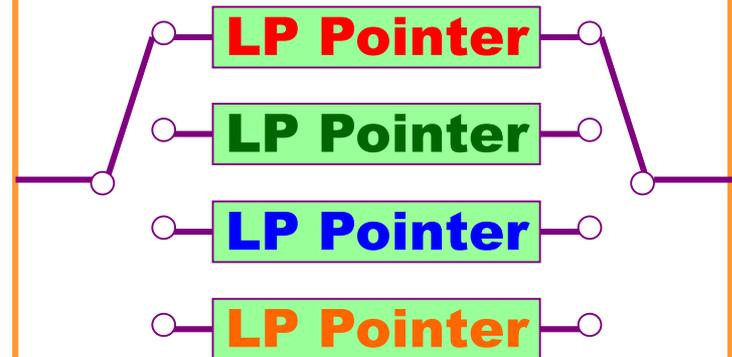
$$H(z) = 1/(1 - z^{-1})$$

Current Cell



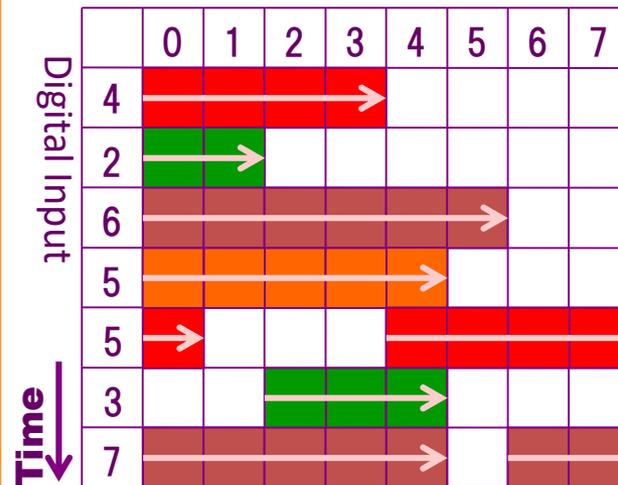
Multi-BP Algorithm (LPF)

N=4



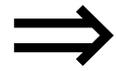
$$H(z) = 1/(1 - z^{-4})$$

Current Cell

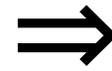


Type II

HP



BP



Multi-BP

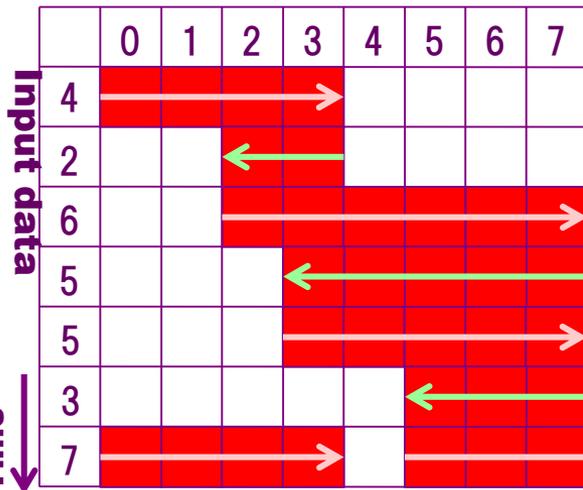
HP Algorithm



$$H(z) = 1/(1+Z^{-1})$$

Back and forth

Current cell

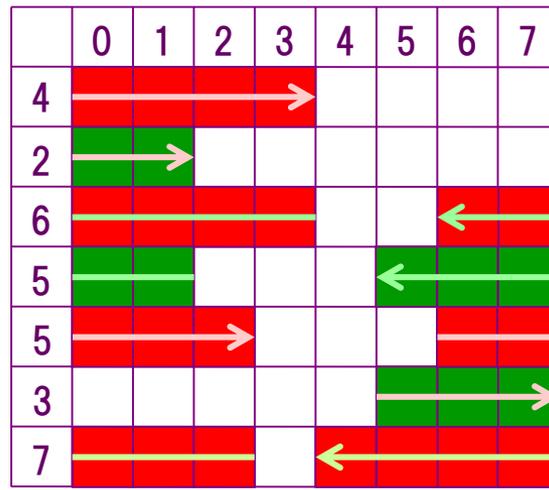


BP Algorithm

N=2

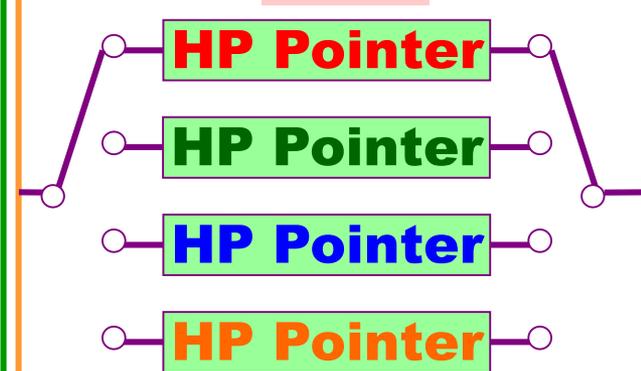


$$H(z) = 1/(1+Z^{-2})$$

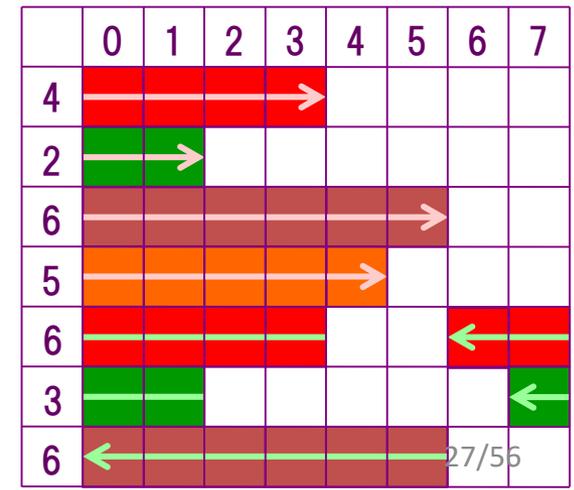


Multi-BP Algorithm

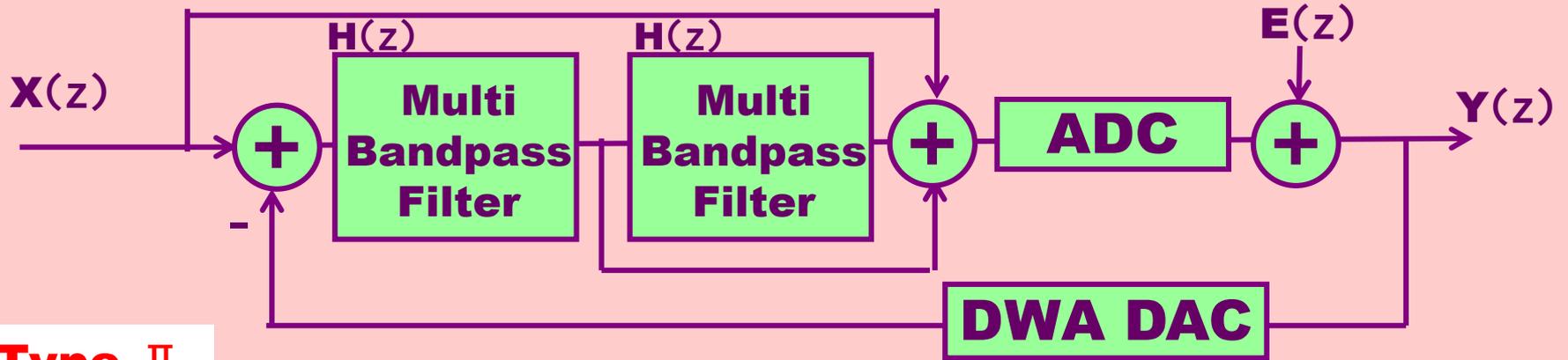
N=4



$$H(z) = 1/(1+Z^{-4})$$



Multi-BP Type II N=4



Type II

$$H(z) = \frac{-z^{-4}}{1+z^{-4}}$$

$$\text{STF} = -z^{-4}$$

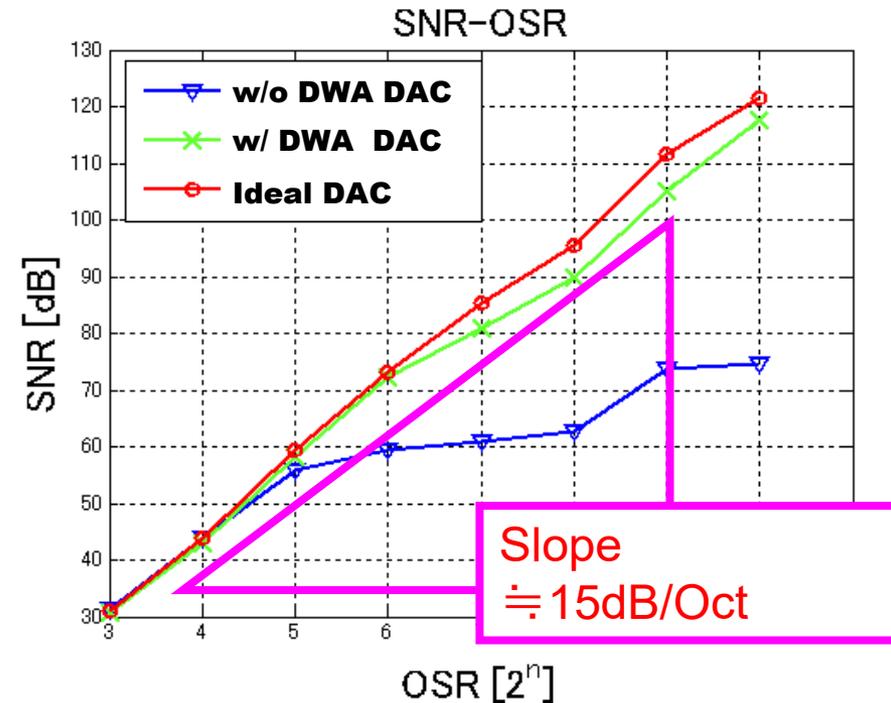
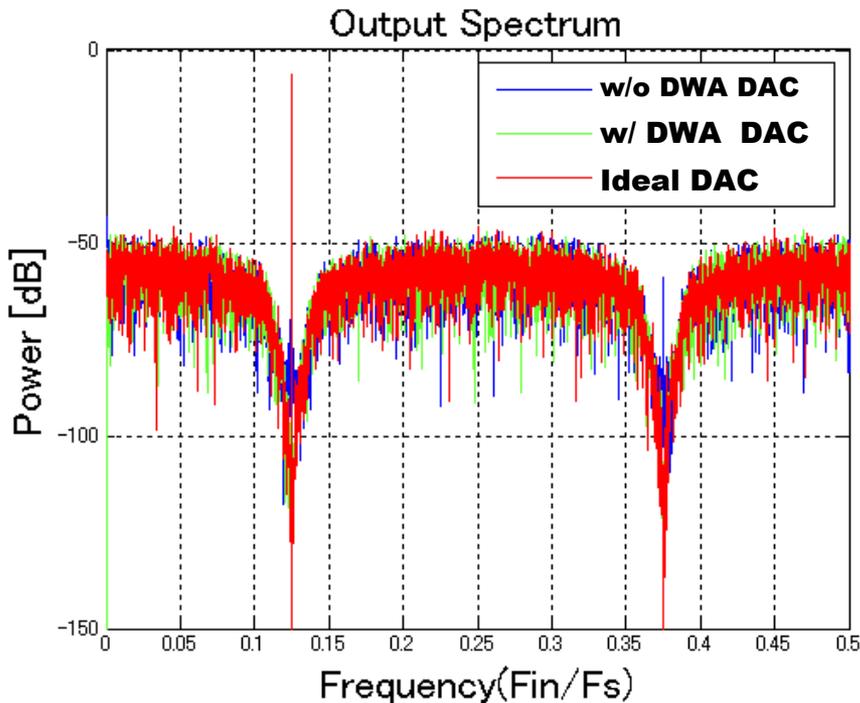
$$\text{NTF} = (1+z^{-4})^2$$

Signal Bands

1/8, 3/8

X Fs

Multi-BP Type II N=4 Simulation Results



Multi-BP DWA algorithm is effective

Contents

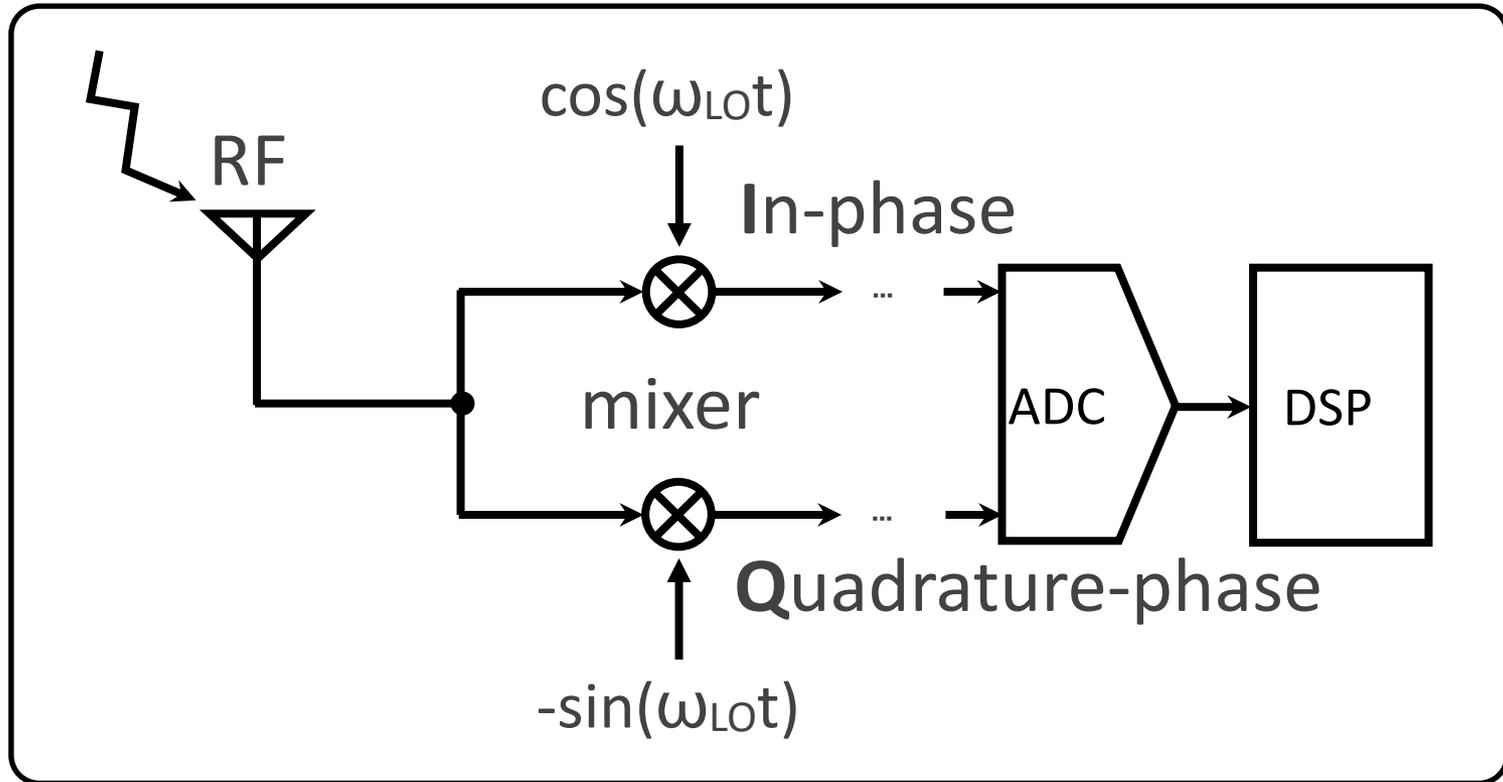
- Research Objective
- What is DWA ?
- LP, HP DWA
- Multi-Bandpass DWA
- **Multi-Bandpass Complex DWA**
- Second-Order DWA
- Application to Multi-bit $\Delta\Sigma$ TDC
- Conclusion

[1] M. Murakami, H. Kobayashi, et.al.,
"I-Q Signal Generation Techniques for Communication IC Testing and
ATE Systems", IEEE International Test Conference (Nov. 2016).

[2] H. San, H. Kobayashi, et. al., "A Second-Order Multi-bit Complex
Bandpass $\Delta\Sigma$ AD Modulator With I, Q Dynamic Matching and DWA
Algorithm", IEICE Trans. Electron, (June 2007).

Necessity of I,Q signal

RF analog front-end of Receiver IC

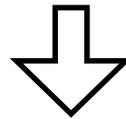


Need testing!

Necessity of Multi-Tone Signal

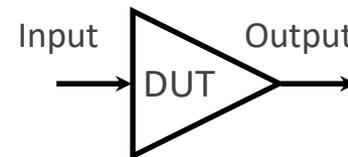
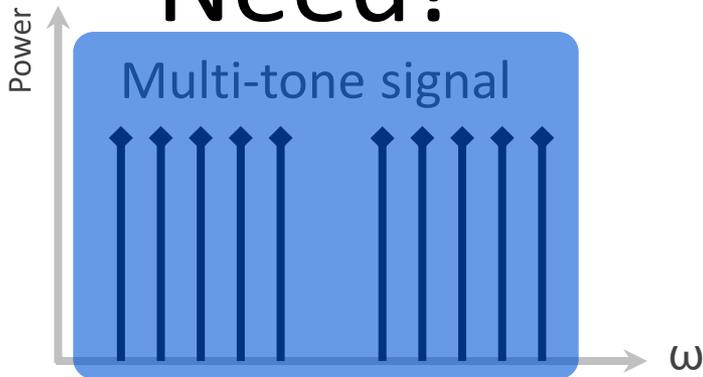
Linearity testing of

- ✓ Mixer
- ✓ Up/Down converter
- ✓ Radio communication system , etc.

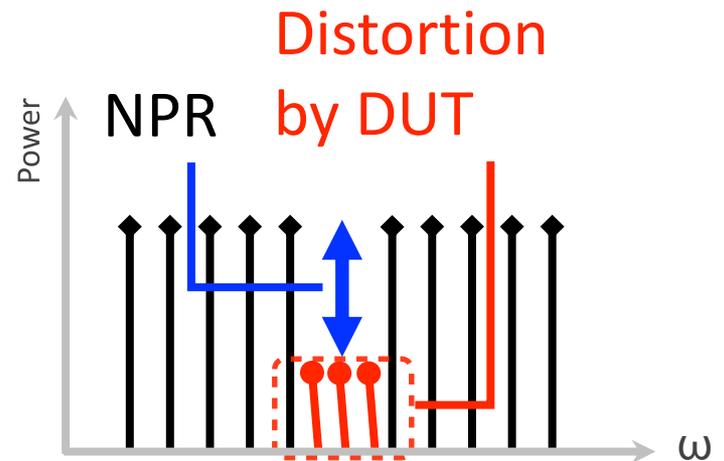


Noise Power Ratio (NPR)

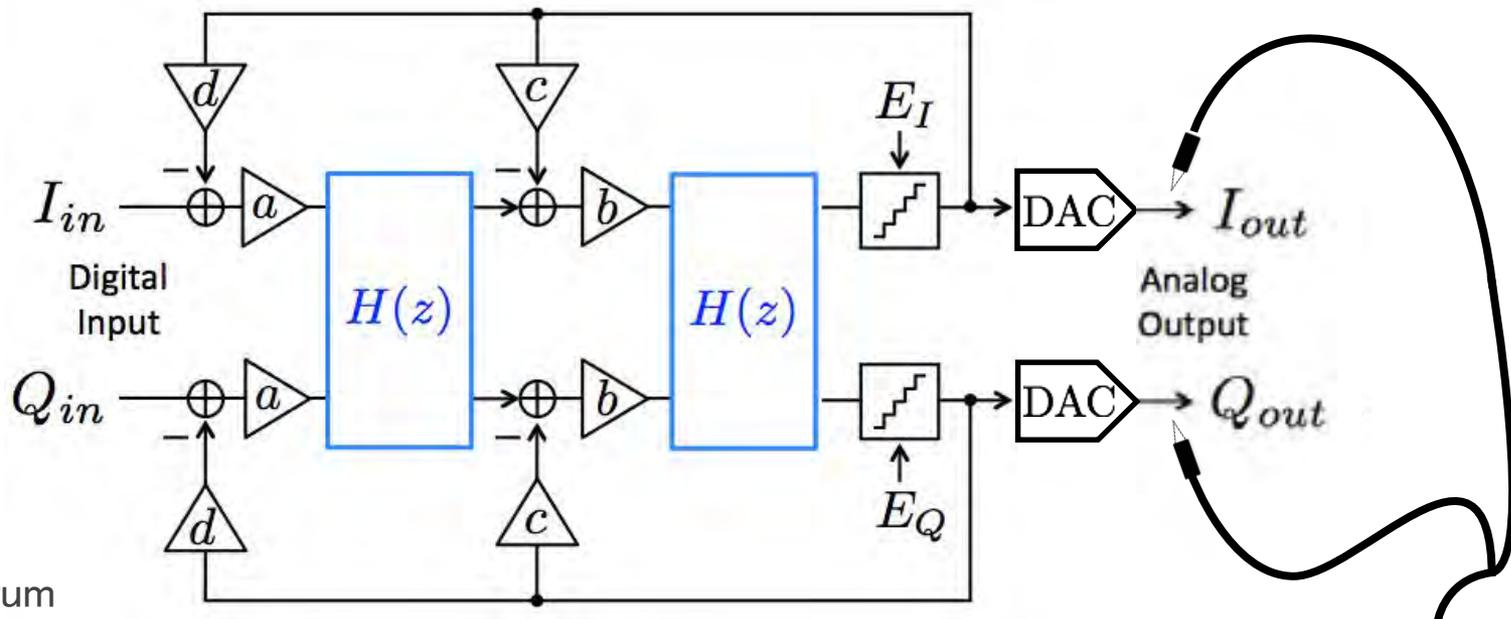
Need!



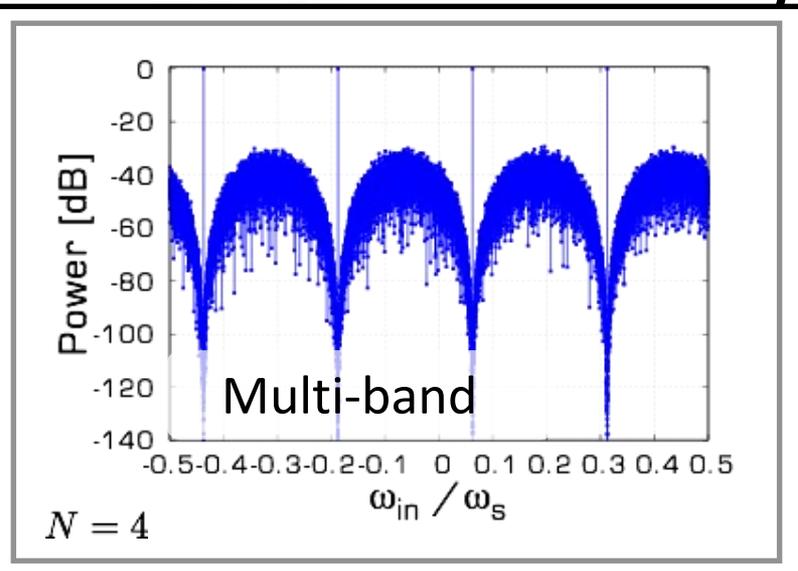
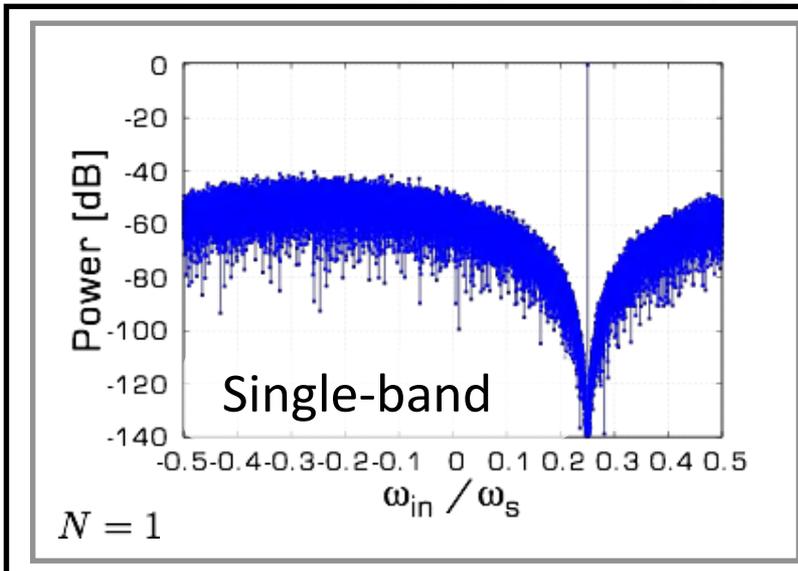
DUT: Device Under Test



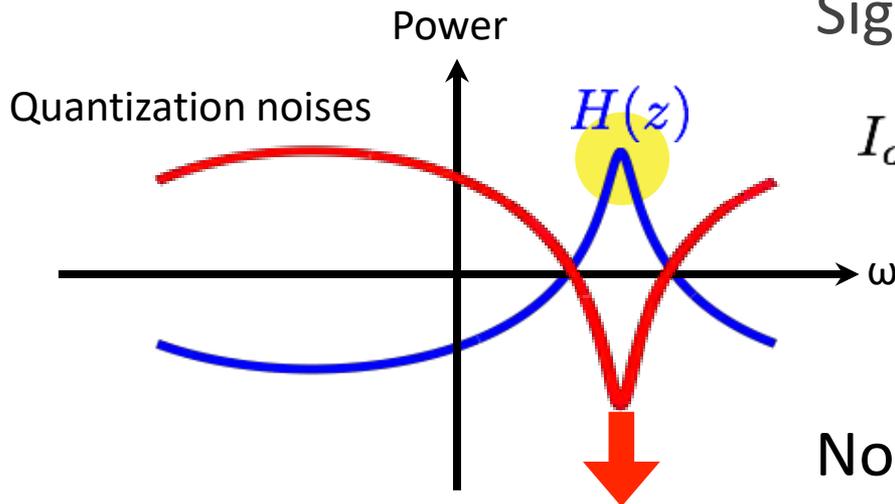
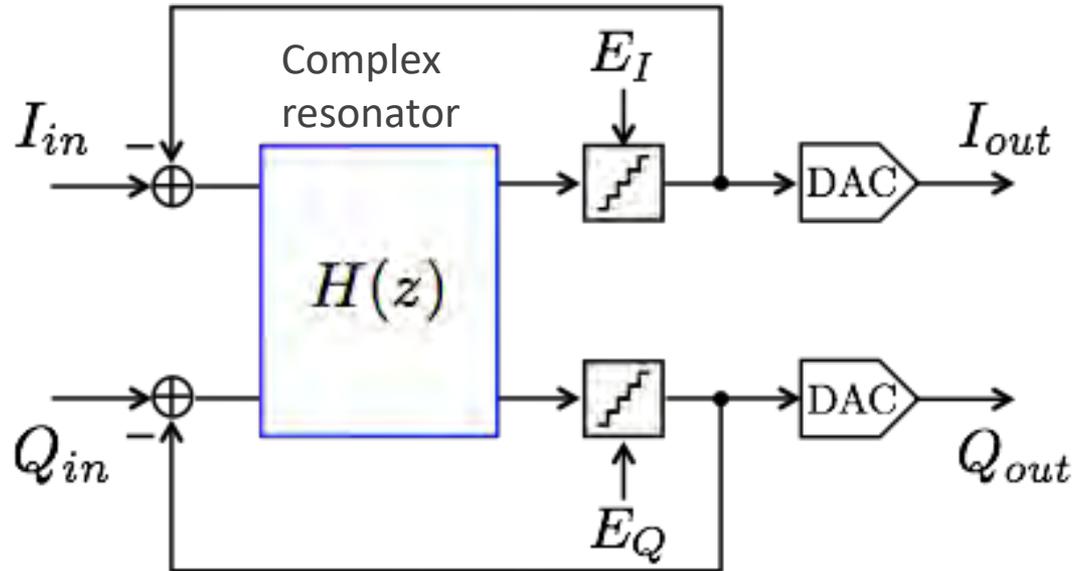
2nd-order Complex Multi-BP $\Delta\Sigma$ DAC



Output spectrum



Principle of Complex BP Noise Shape

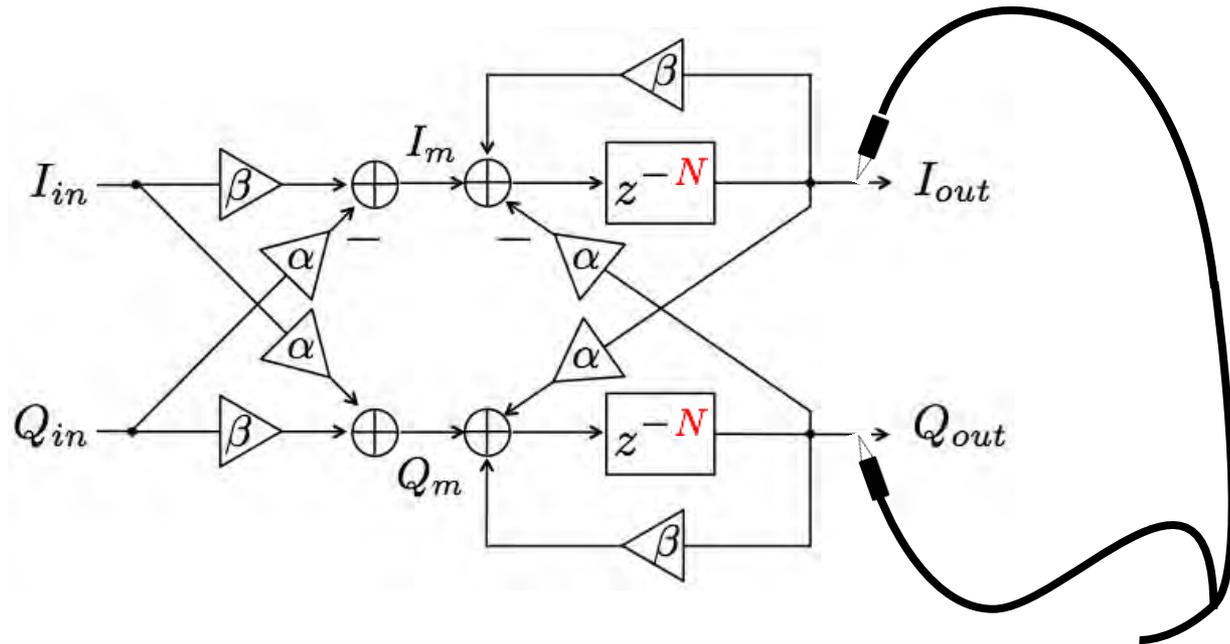


Signal Transfer Function = 1

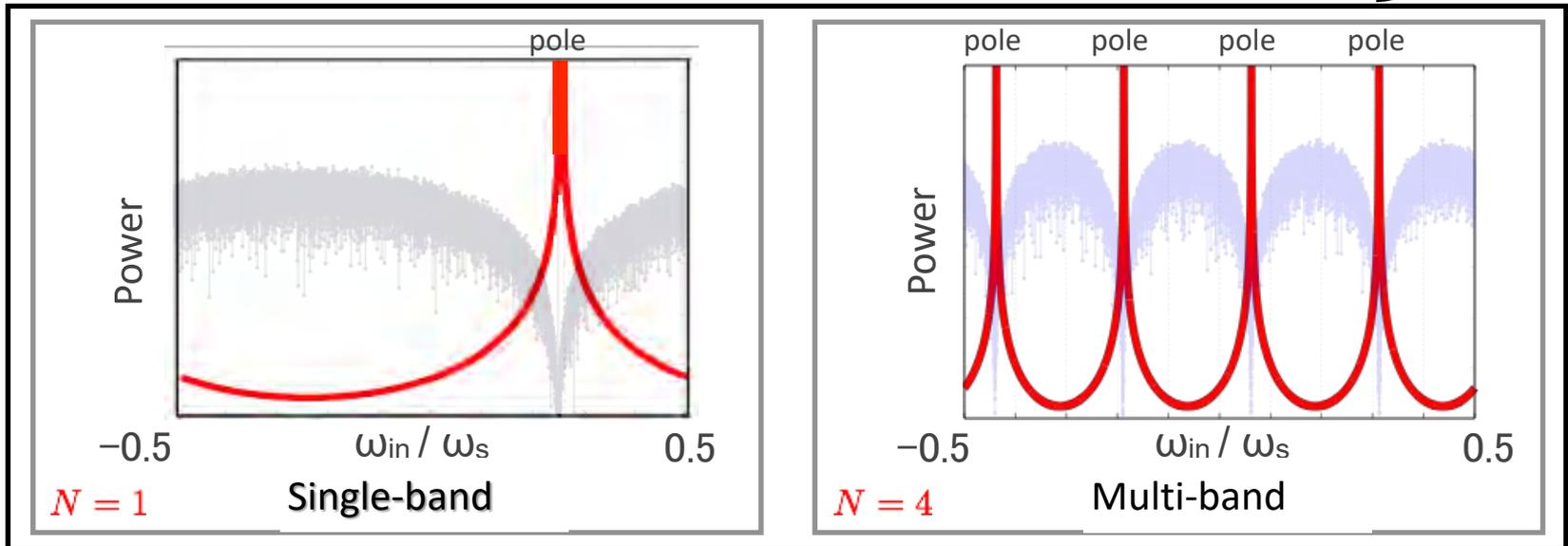
$$I_{out} + jQ_{out} = \boxed{1} (I_{in} + jQ_{in}) + \boxed{0} (E_I + jE_Q)$$

Noise Transfer Function = 0

Complex Resonator

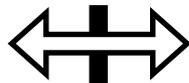


Output spectrum

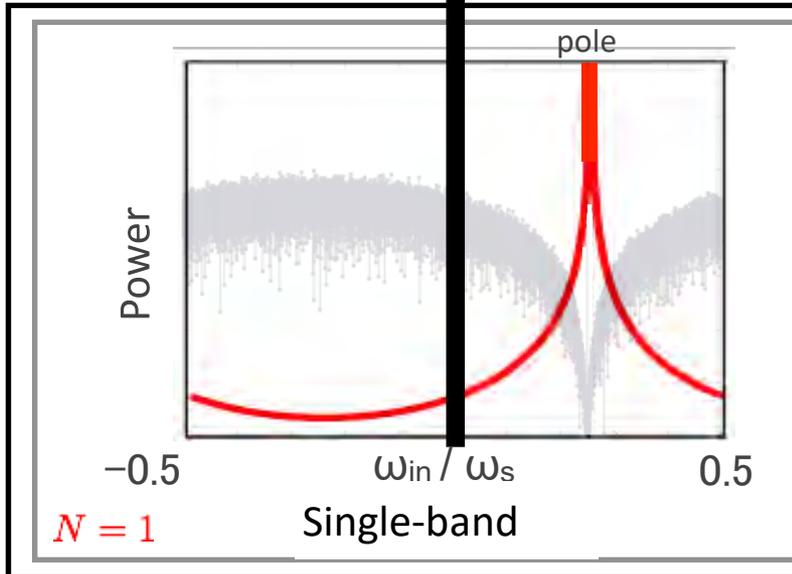


Complex Resonator

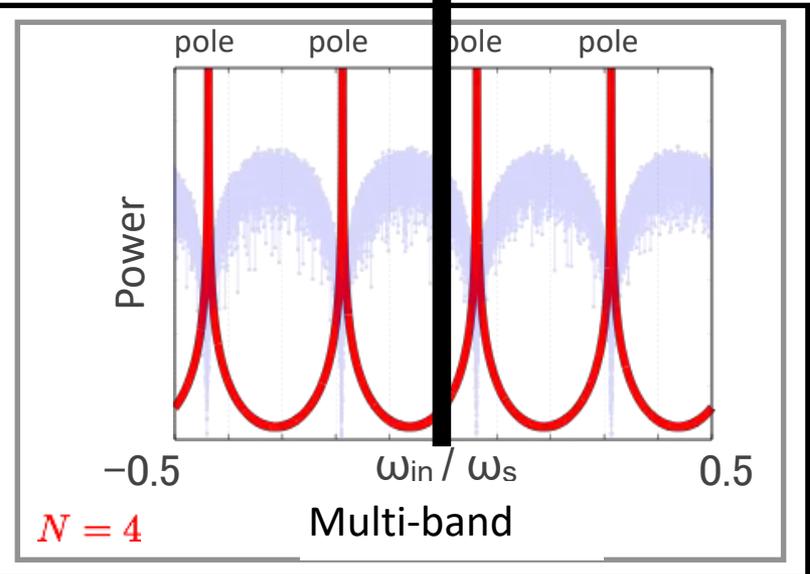
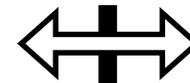
Asymmetric



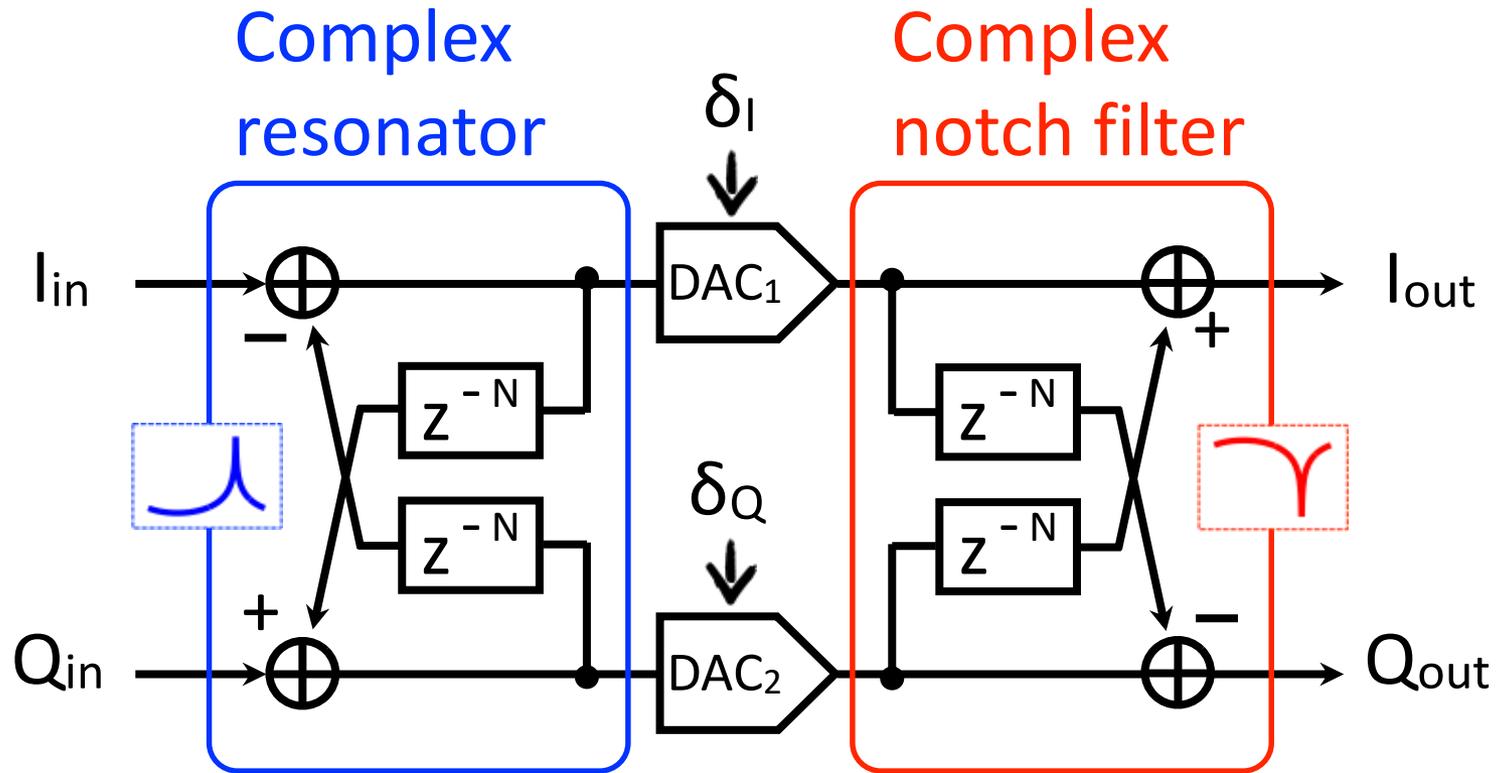
Output spectrum



Asymmetric

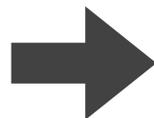


Equivalent Circuit of Complex DWA



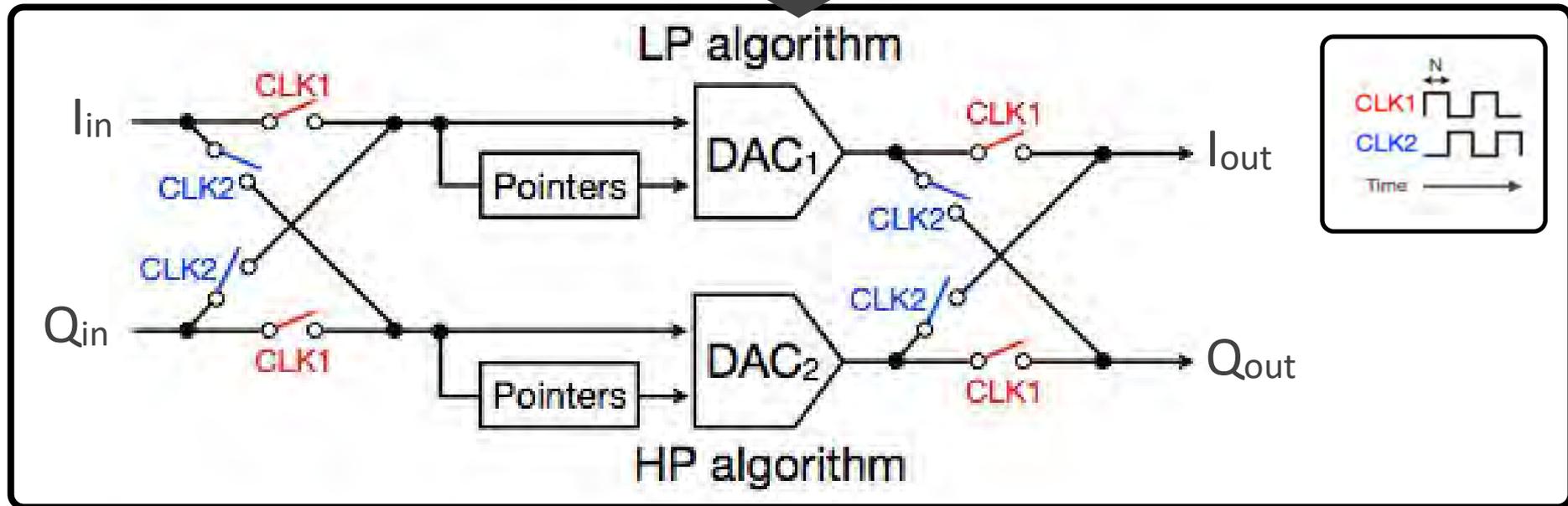
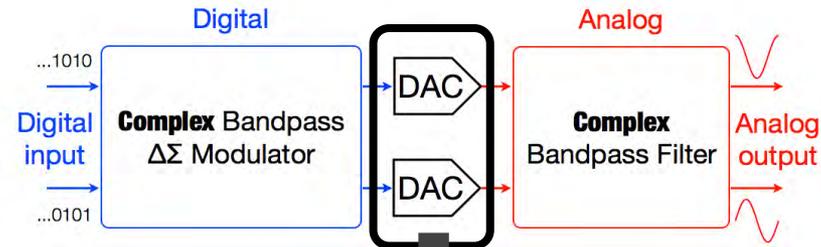
δ_I, δ_Q affected by only complex notch

DAC input can be



Can't be realized directly

Equivalent Circuit Implementation

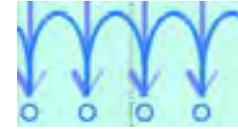


- ◆ Attach pointers
- ◆ Exchange upper-path and lower-path every N clock

➔ Complex DWA is realized.

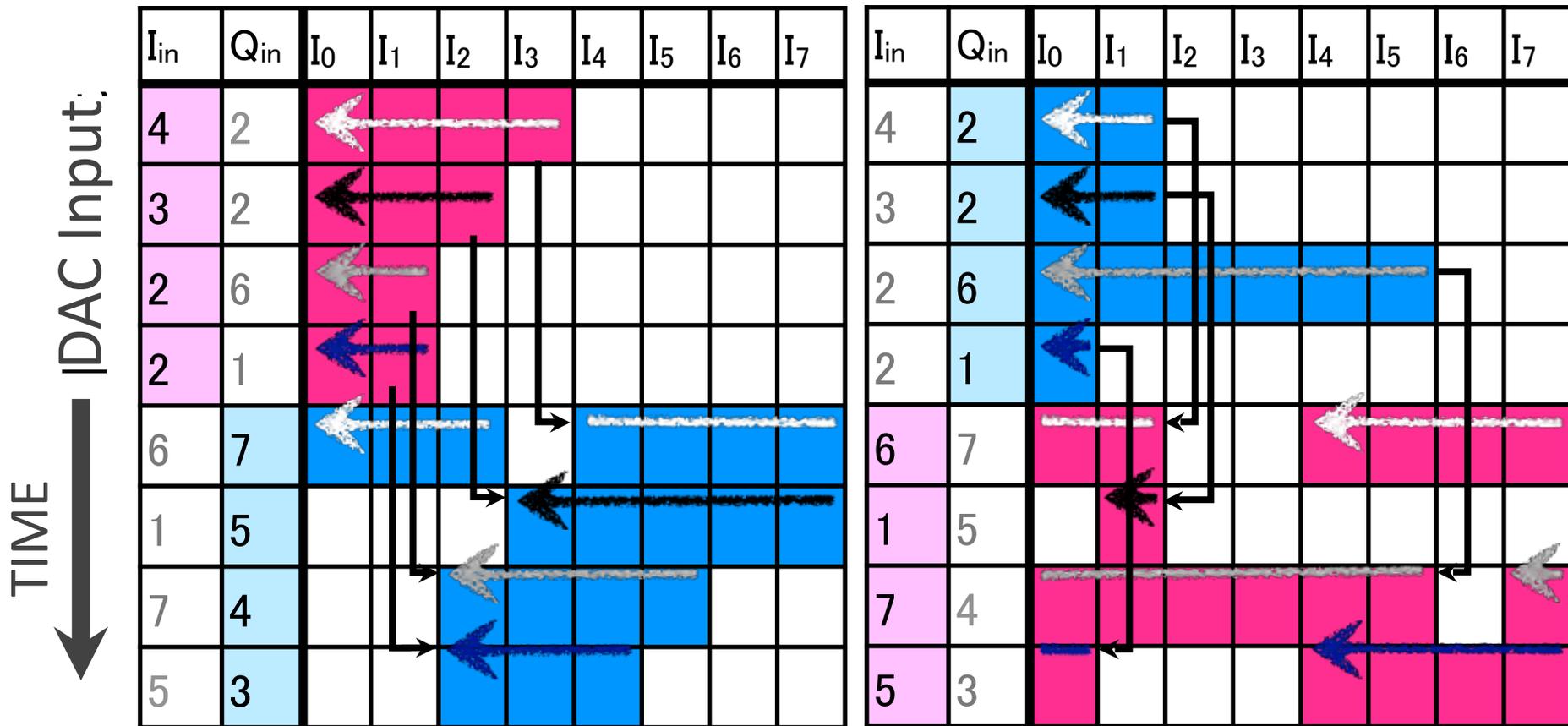
Complex Multi-Bandpass DWA Algorithm

$N = 4$ (four zero points)

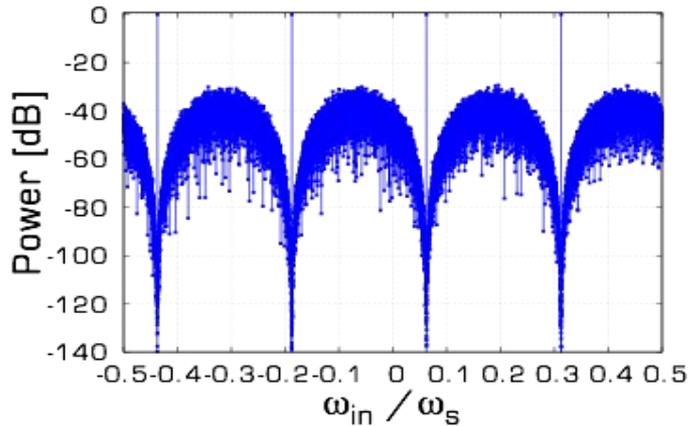
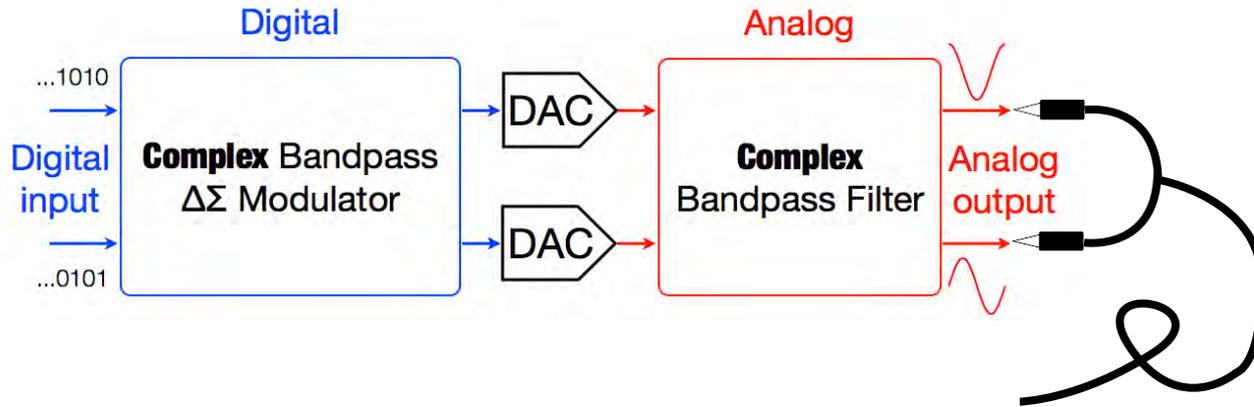


DAC₁ (**LP** operation)

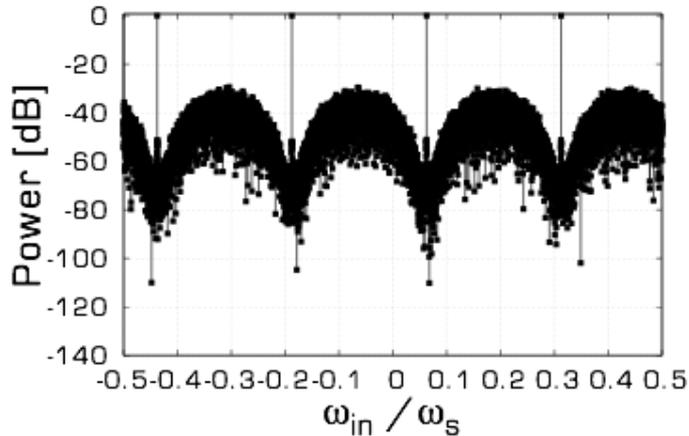
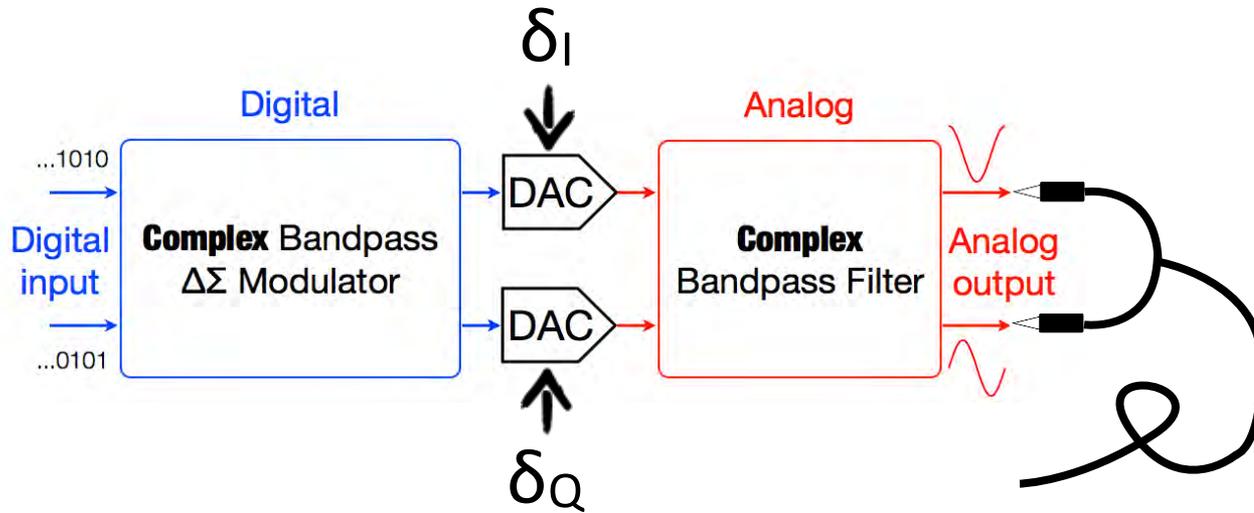
DAC₂ (**HP** operation)



Simulation Result ~Ideal Linear DAC~



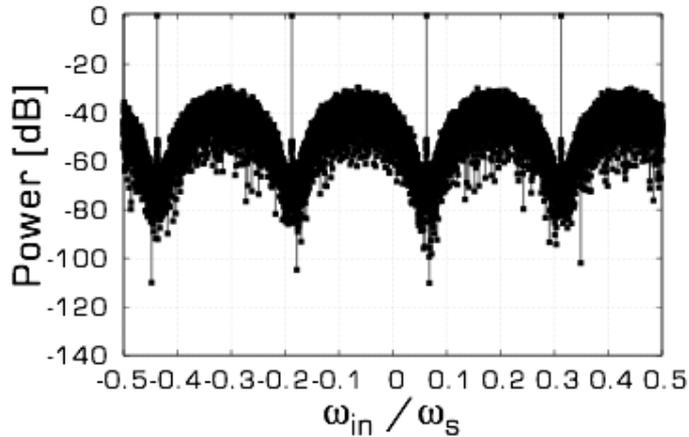
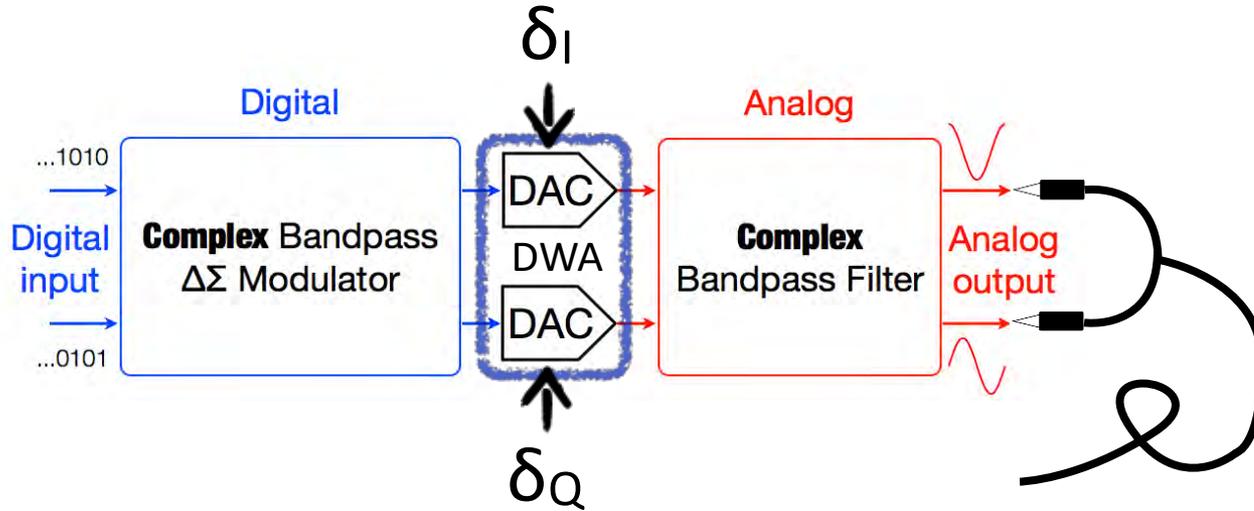
Simulation Result ~Actual Non-Linear DAC~



Notches filled with noise

Simulation Result

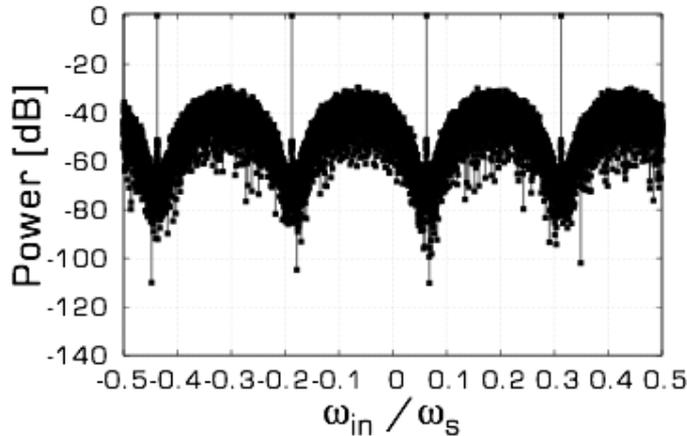
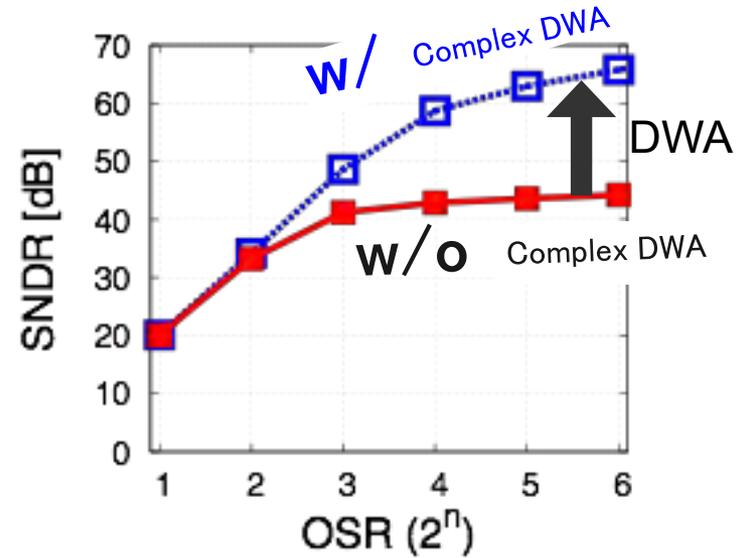
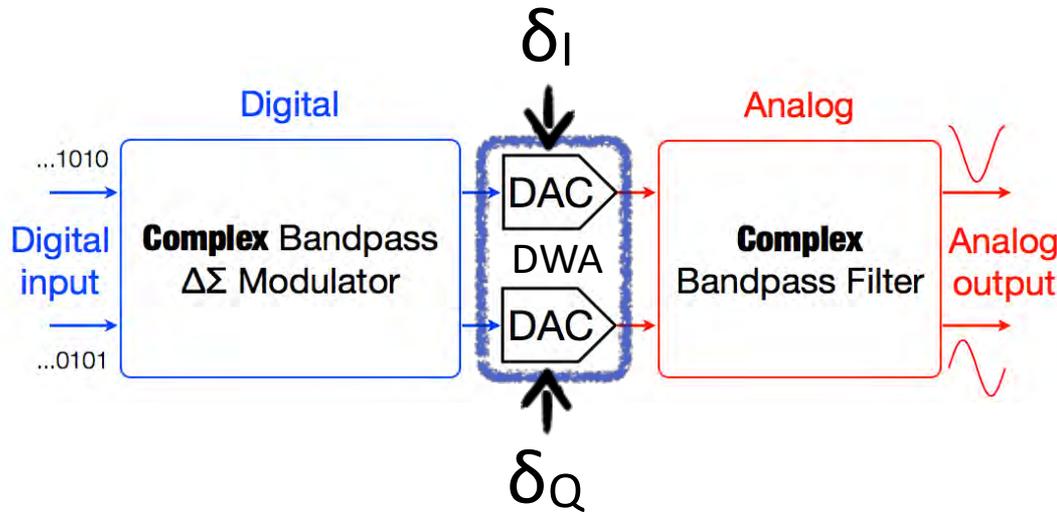
~Actual Non-Linear DAC + DWA~



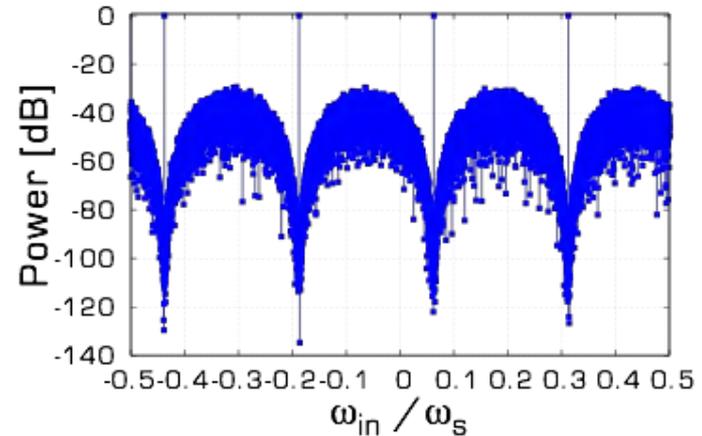
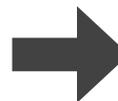
Notches filled with noise

Simulation Result

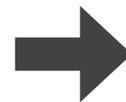
~Actual Non-Linear DAC + DWA~



DWA



Notches filled with noise



Steep Notches

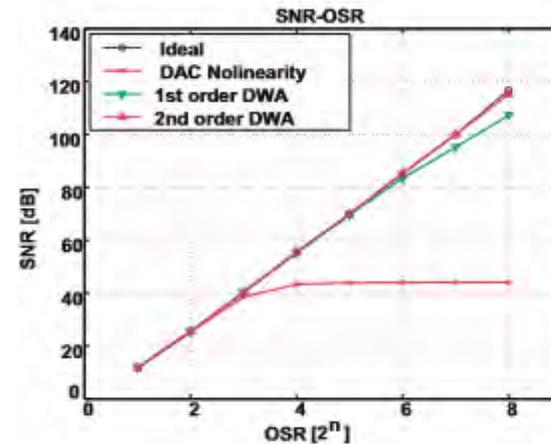
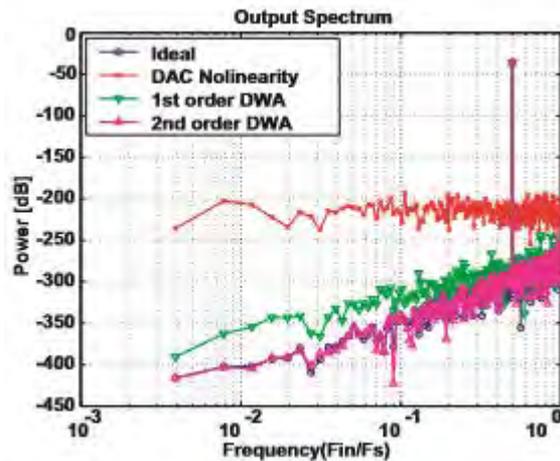
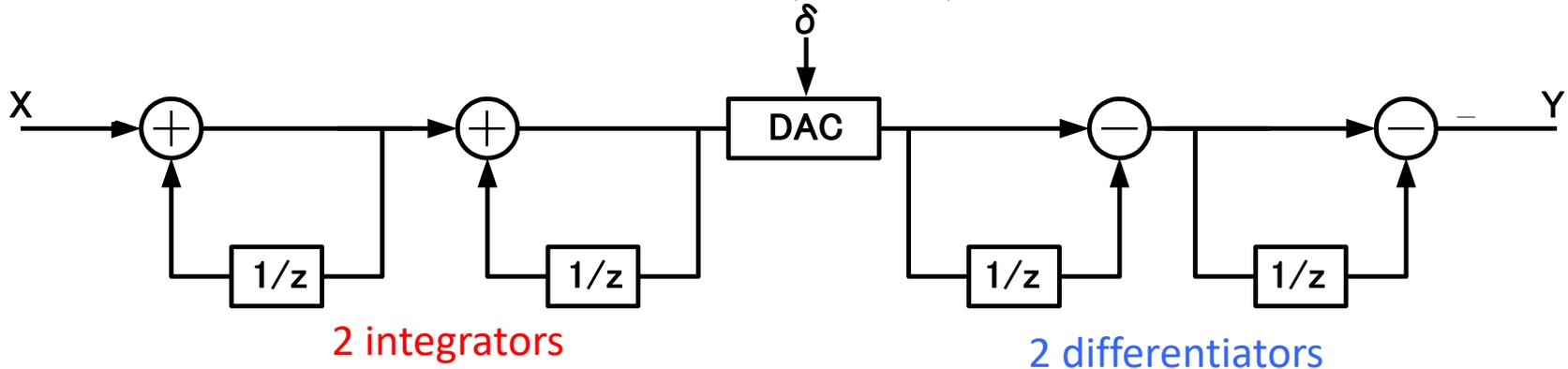
Contents

- Research Objective
- What is DWA ?
- LP, HP DWA
- Multi-Bandpass DWA
- Multi-Bandpass Complex DWA
- **Second-Order DWA**
- Application to Multi-bit $\Delta\Sigma$ TDC
- Conclusion

[1] H. Hagiwara, H. Kobayashi, et. al.,
“DA Converter Circuit Provided with DA Converter of
Segmented Switched Capacitor Type”,
US Patent Application, Pub. No.: US 2005/0285768 A1 (Dec. 29, 2005).

2nd-order DWA

$$Y(z) = X(z) + (1 - z^{-1})^2 \delta(z)$$



- 2nd-order DWA is more effective
- But its circuit/operation become complicated

Contents

- Research Objective
- What is DWA ?
- LP, HP DWA
- Multi-Bandpass DWA
- Multi-Bandpass Complex DWA
- Second-Order DWA
- **Application to Multi-bit $\Delta\Sigma$ TDC**
- Conclusion

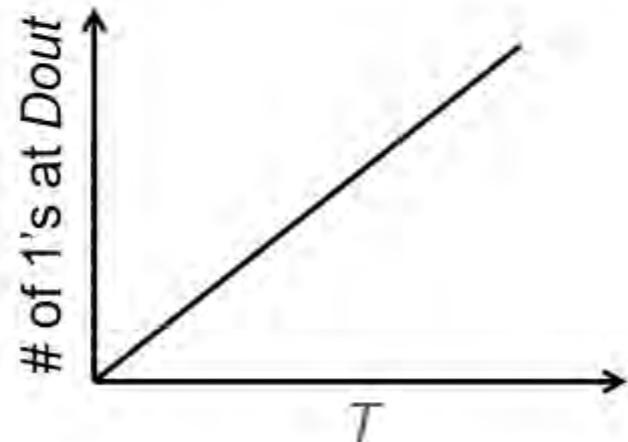
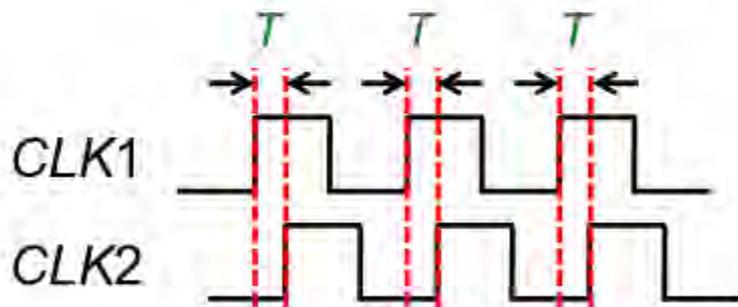
[1] T. Chujo, H. Kobayashi, et. al.,
“Timing Measurement BOST With Multi-bit Delta-Sigma TDC”,
20th IEEE International Mixed-Signal Testing Workshop (June 2015).

$\Delta\Sigma$ TDC Features

Timing T measurement between CLK1 and CLK2



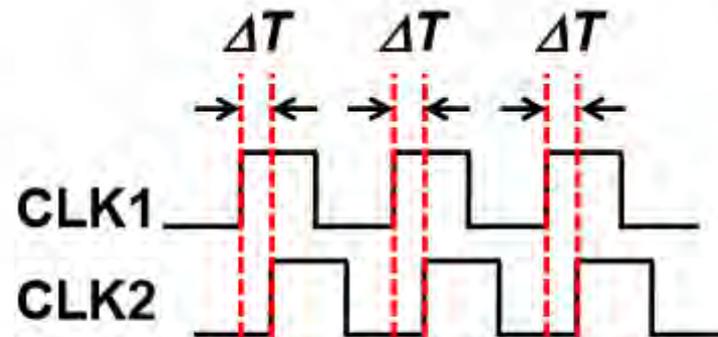
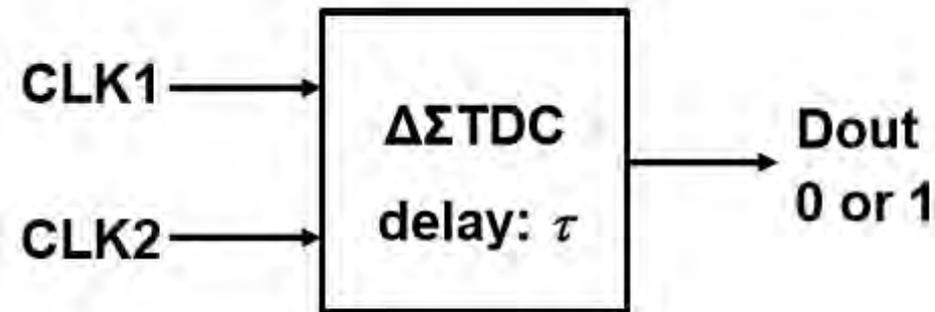
$\Delta\Sigma$ Time-to-Digital Converter (TDC)



$$T \propto \# \text{ of } 1' \text{ at } Dout$$

- Simple circuit
- High linearity
- Measurement time \rightarrow longer \Rightarrow time resolution \rightarrow finer

Principle of $\Delta\Sigma$ TDC



Dout # of 1's is proportional to ΔT

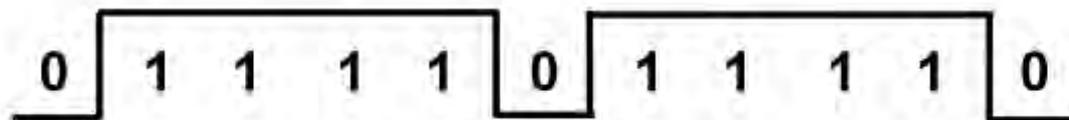
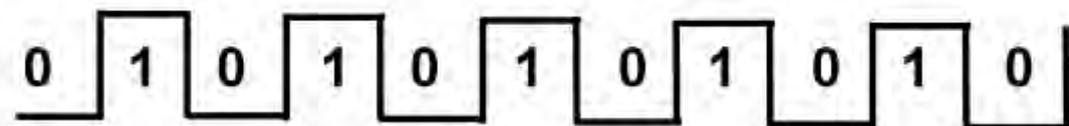
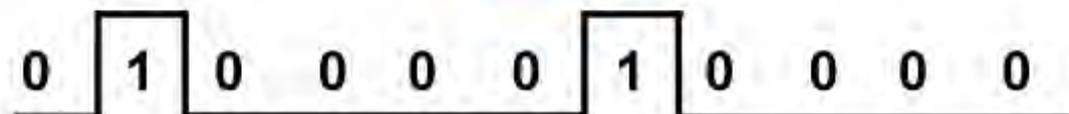
ΔT

of 1's

Dout

short

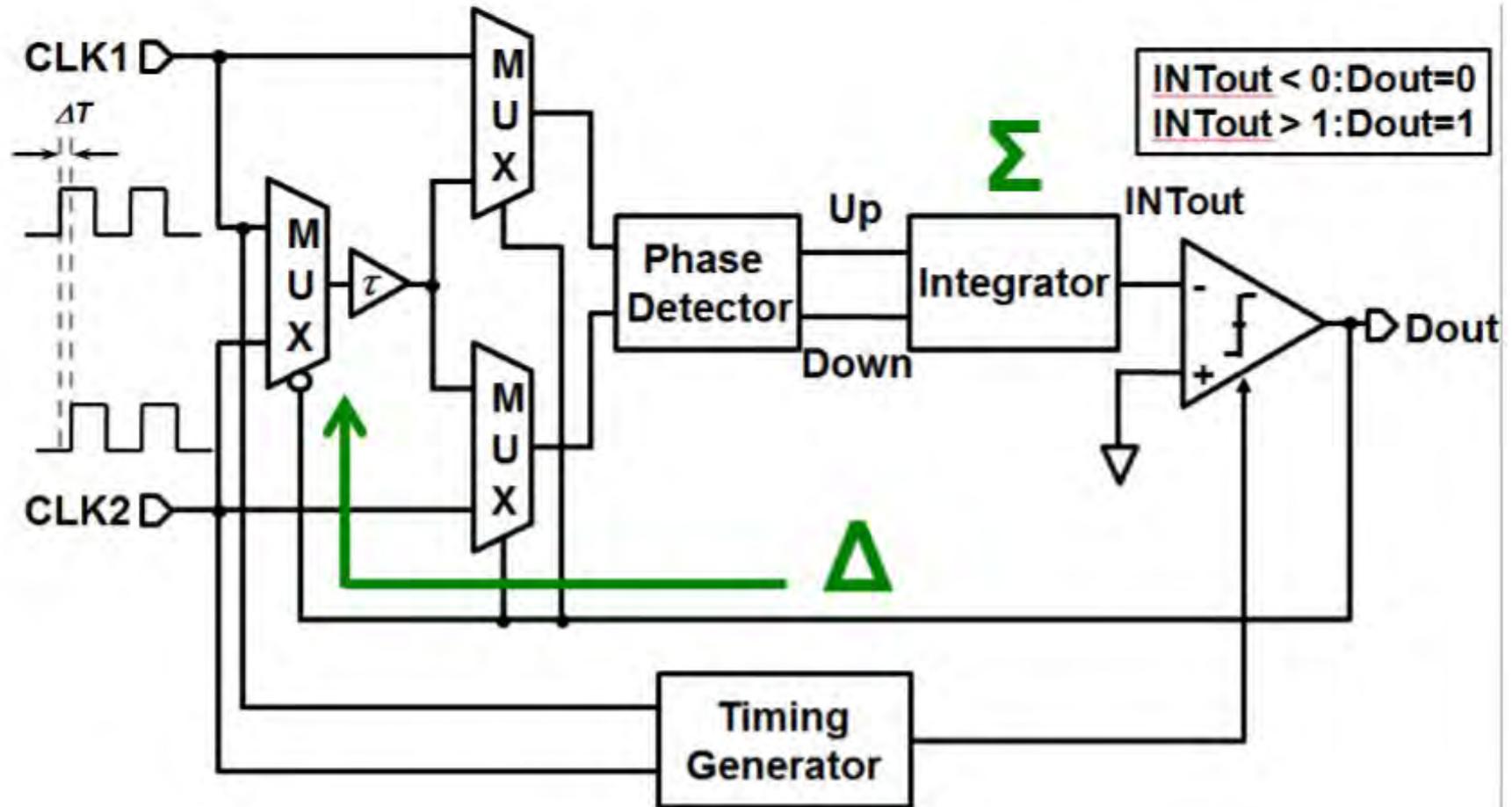
few



long

many

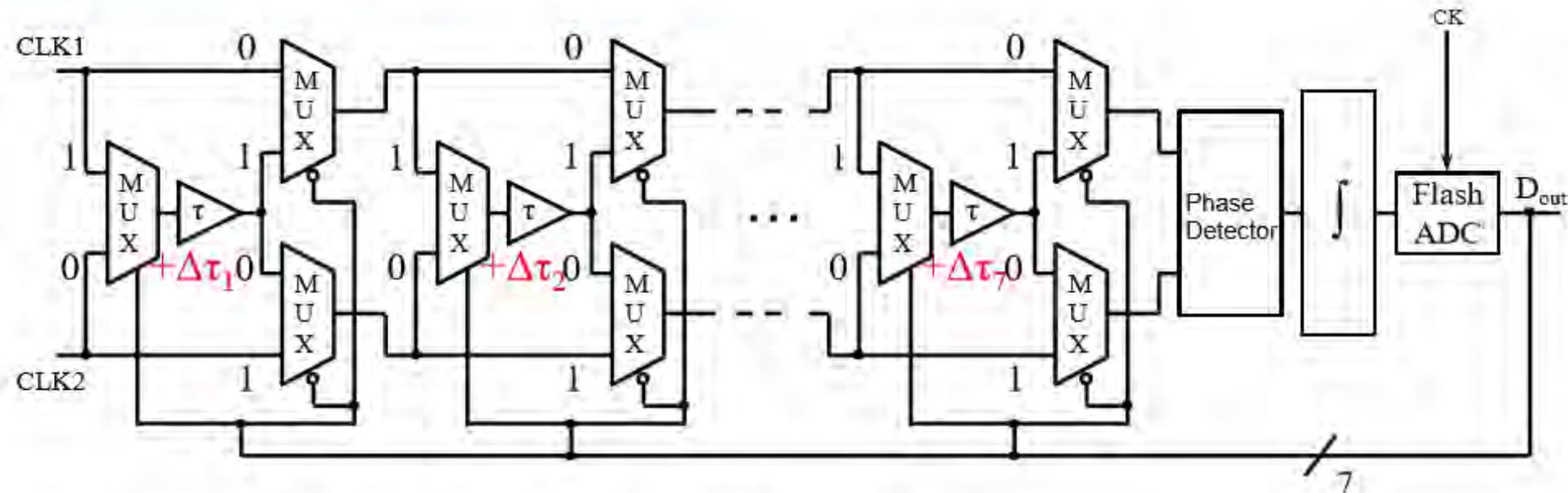
$\Delta\Sigma$ TDC Configuration



[1] T. Chujo, H. Kobayashi, "Timing Measurement BOST With Multi-bit Delta-Sigma TDC", IEEE IMSTW (June 2015).

[2] Y. Osawa, H. Kobayashi, "Phase Noise Measurement Techniques Using Delta-Sigma TDC", IEEE IMS3TW (Sept. 2014).

Multi-Bit $\Delta\Sigma$ TDC



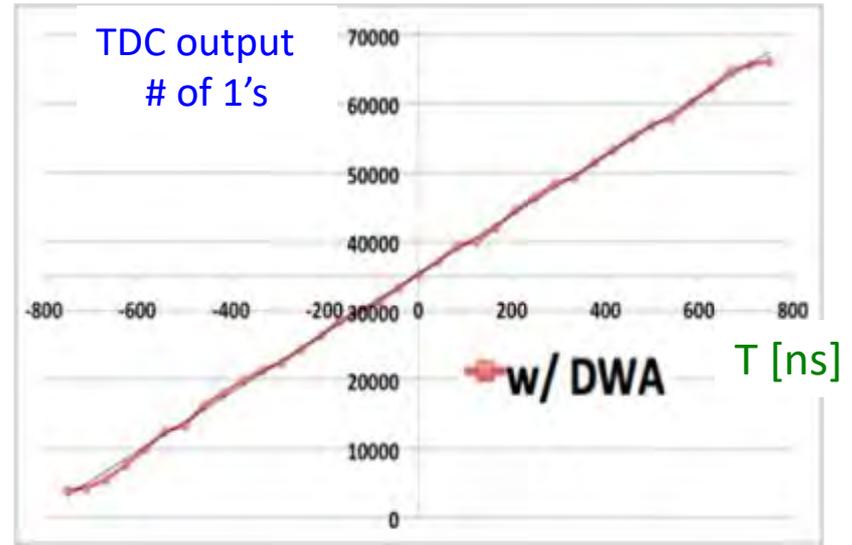
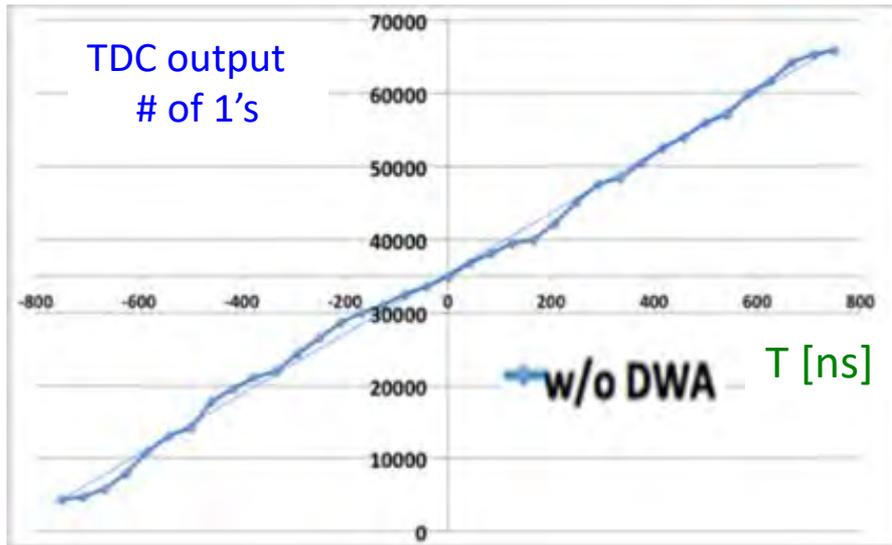
- 3-bit : 7 comparators and delays
- Fine time resolution with a given measurement time



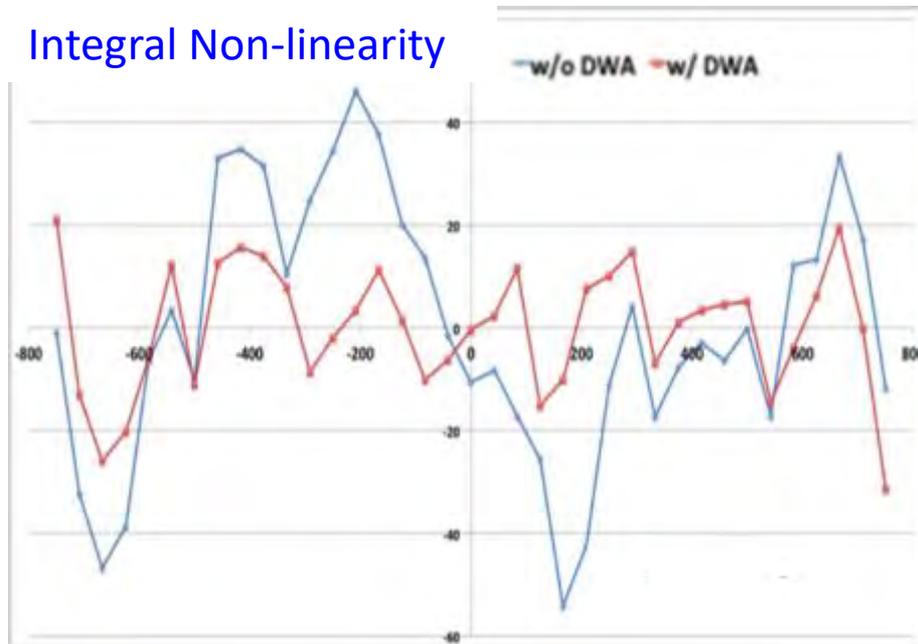
Shorter measurement time with a given time resolution

- TDC non-linearity due to mismatches among delay cells.

Measured Result



Integral Non-linearity



10,000 TDC
output data
are measured.



Analog FPGA
Implementation

Contents

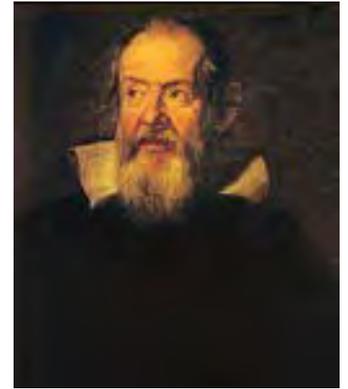
- Research Objective
- What is DWA ?
- LP, HP DWA
- Multi-Band DWA
- Multi-Band Complex DWA
- Second-Order DWA
- Application to Multi-bit $\Delta\Sigma$ TDC
- Conclusion

Conclusion

- Spectrum shaping of errors is possible with DWA algorithms.
Their hardware implementation is simple.
- So far, DWA algorithm derivation is based on mathematical intuition of the researcher as well as simulation.
There are no systematic or theoretical methods.
- There are still possibilities of new DWA algorithms.

Final Statement

Mathematics is the alphabet
with which God has written the Universe.



Galileo Galilei

Mathematics is the alphabet
with which the circuit designer writes his/her new idea.

参考文献リスト (pdf ファイルを読んでみてください)

- [1] Jianlong Wang, Gopal Adhikari, Nobukazu Tsukiji, Haruo Kobayashi
"Analysis and Design of Operational Amplifier Stability Based on Routh-Hurwitz Stability Criterion",
電気学会論文誌 (和文誌C), vol. 138, no. 12, pp.1517-1528 (2018年12月)

https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejeiss/138/12/138_1517/_article

- [2] 元澤篤史、萩原 広之、山田 佳央、小林 春夫、小室 貴紀、傘 昊
「マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器技術とその応用」
電子情報通信学会誌 和文誌 C vol. J90-C, no.2, pp.143-158 (2007年2月).

https://kobaweb.ei.st.gunma-u.ac.jp/news/pdf/j90-c_2_143.pdf