

Signal-Suppression Feed Forward (信号抑制フィードフォワード) を用いた広帯域LNAの低消費電力 ノイズキャンセル技術

興 大樹, ○河内 智, 李 从兵, 神山 雅貴, 高橋 伸夫(群馬大学)
馬場 清一(豊橋技術科学大学), 壇 徹 (オン・セミコンダクター)
小林 春夫 (群馬大学)

- 研究背景と目的
- 信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術
 - 概要
 - 雑音解析
 - 歪み解析
 - 信号抑制技術
- シミュレーション
 - 動作確認
 - 設計例
- まとめと今後の課題

・研究背景と目的

・信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術

－概要

－雑音解析

－歪み解析

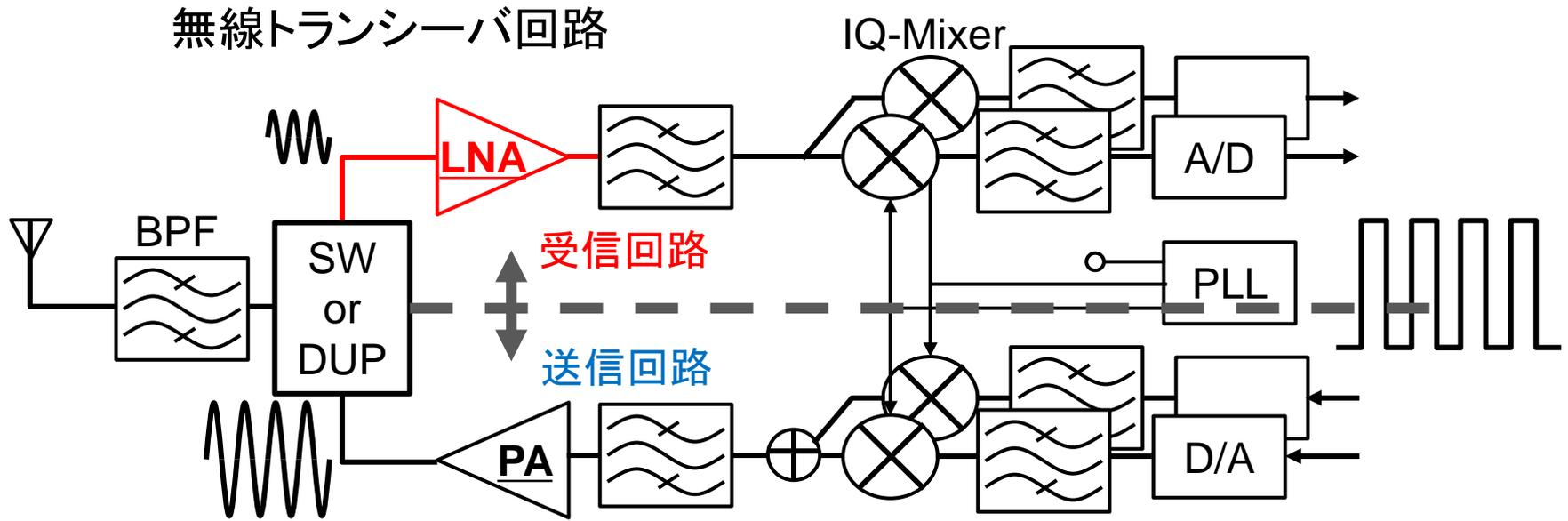
－信号抑制技術

・シミュレーション

－動作確認

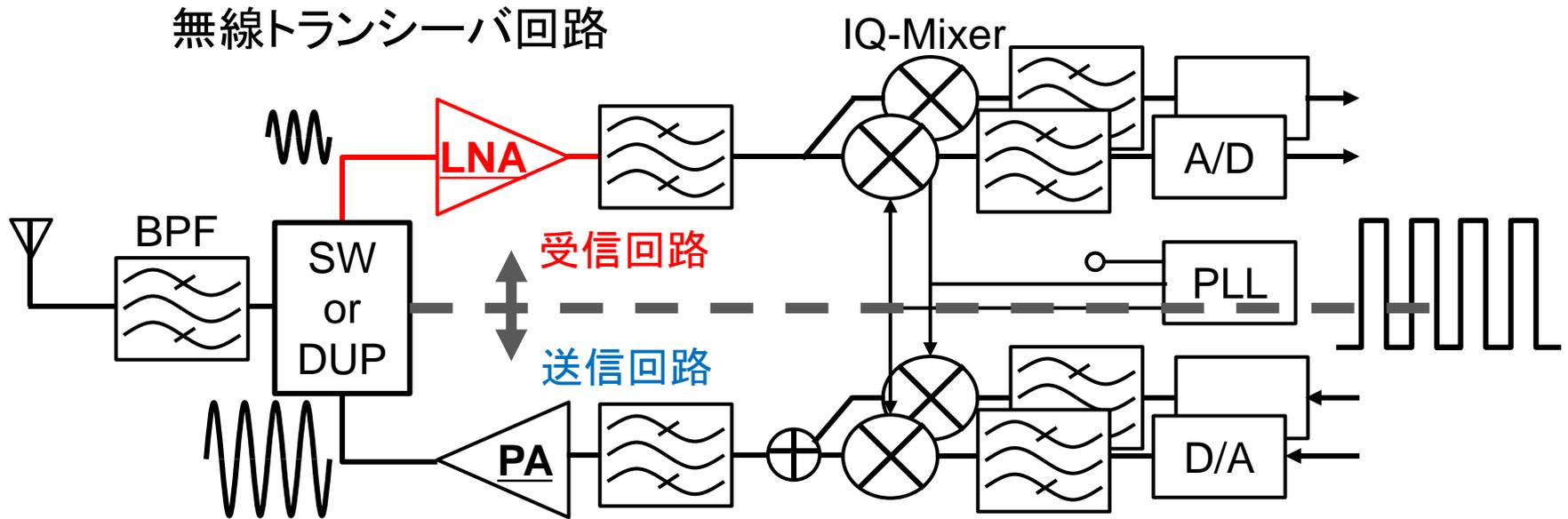
－設計例

・まとめと今後の課題



受信側
低雑音増幅器:Low Noise Amplifier(LNA)
・・・後段で処理できるレベルまで、**雑音・歪みを付加することなく**信号を増幅する

送信側
電力増幅器:Power Amplifier(PA)
・・・できるだけ大きな電力にして信号をアンテナから送信する



受信側

低雑音増幅器:Low Noise Amplifier(LNA)

- 消費電力は小さいが常に動作(受信信号がいつ来るかわからため)
- トランシーバ回路の**低消費電力化**を目指す

送信側

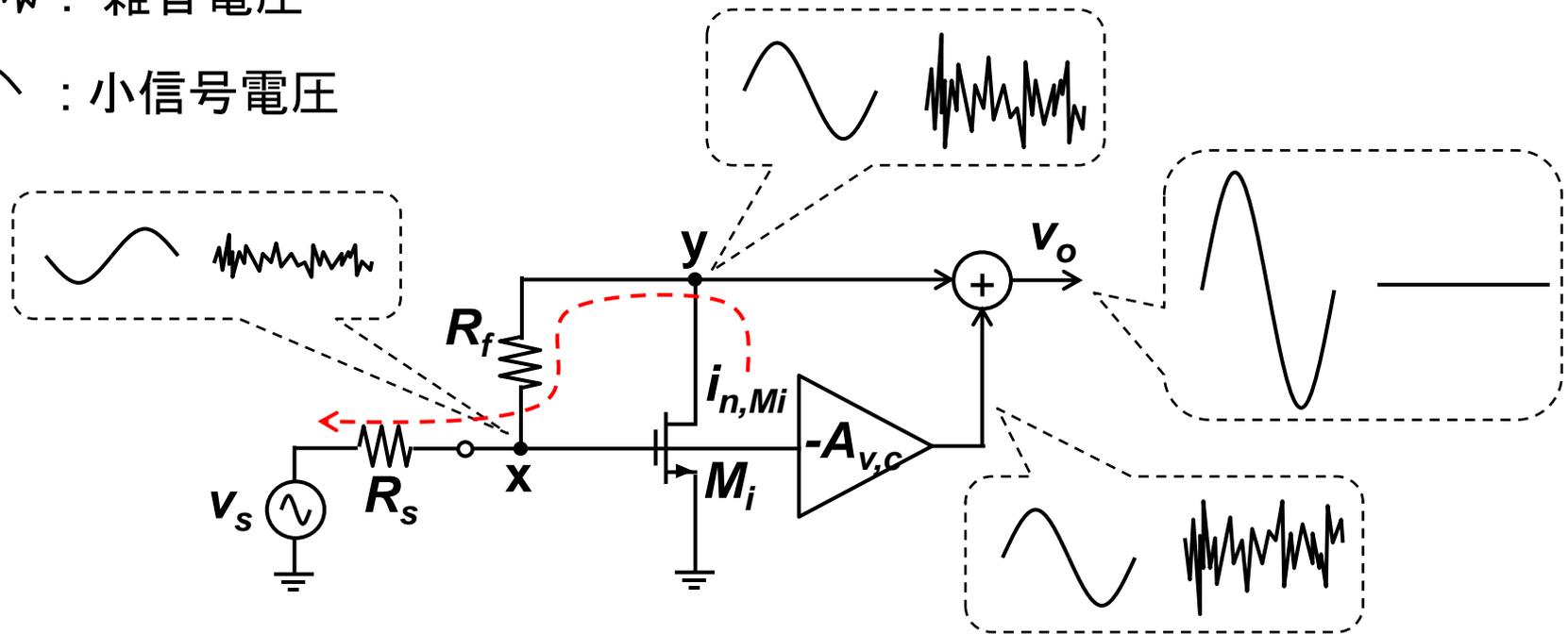
電力増幅器:Power Amplifier(PA)

- 消費電力は大きいが送信時のみ動作

従来のフィードフォワードノイズキャンセルLNAの概要 6

⚡ : 雑音電圧

〰 : 小信号電圧



キャパシタやインダクタを使わない構成

+

M_i のチャネル雑音電流 $i_{n,Mi}$ (支配的な雑音)をキャンセル

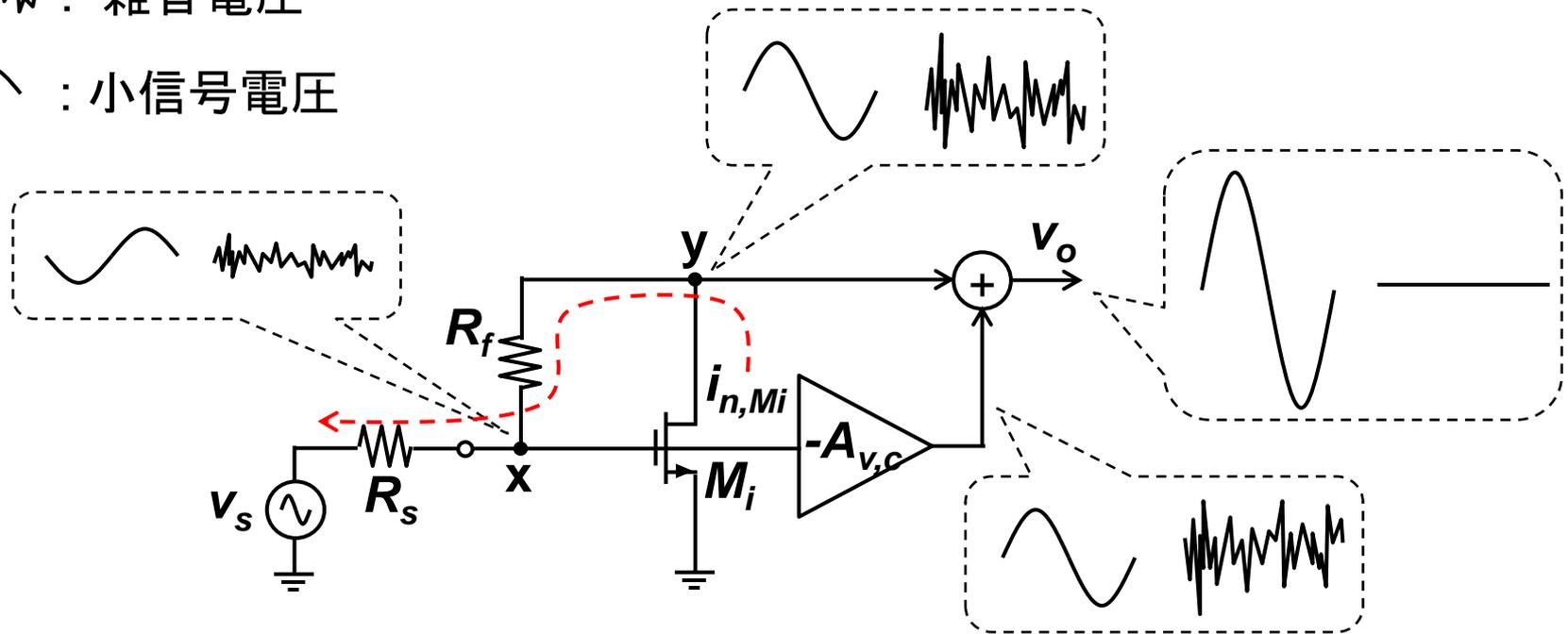
||

広帯域で低雑音なLNA!

従来回路のフィードフォワードノイズキャンセル原理

 : 雑音電圧

 : 小信号電圧



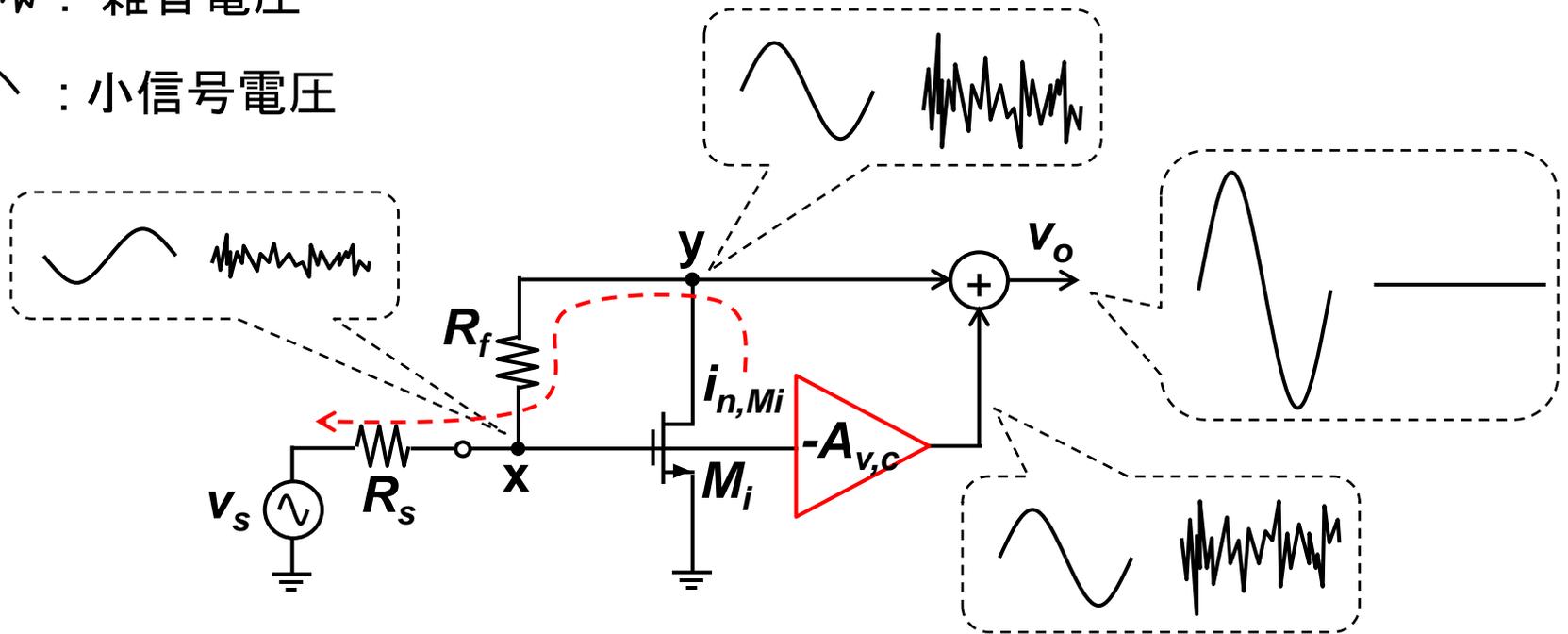
M_i のチャネル熱雑音電流 $i_{n,Mi}$ (支配的な雑音源)をノードxに帰還

ノイズキャンセルアンプ $A_{v,c}$ で反転増幅

ノードyの雑音と加算してノイズをキャンセル
(同様の原理で M_i で発生する歪みもキャンセル可能)

 : 雑音電圧

 : 小信号電圧



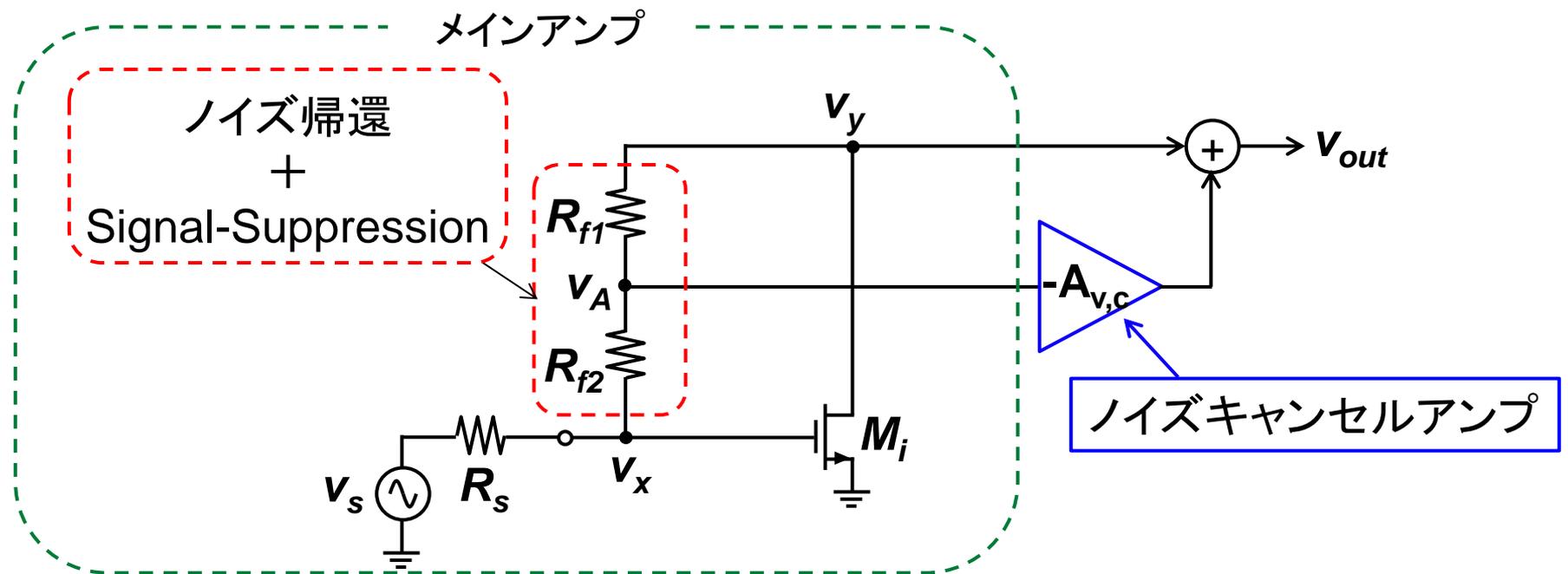
ノイズキャンセルアンプ $A_{v,c}$ により新たに電力を付加

従来回路の課題: 消費電力が大きくなりやすい 😞

ノイズキャンセルアンプ $A_{v,c}$ の消費電力を抑える手法の提案
『信号抑制フィードフォワードノイズキャンセルLNA』

- ・研究背景と目的
- ・信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術
 - －概要
 - －雑音解析
 - －歪み解析
 - －信号抑制技術
- ・シミュレーション
 - －動作確認
 - －設計例
- ・まとめと今後の課題

信号抑制フィードフォワードノイズキャンセルLNAの概要¹⁰



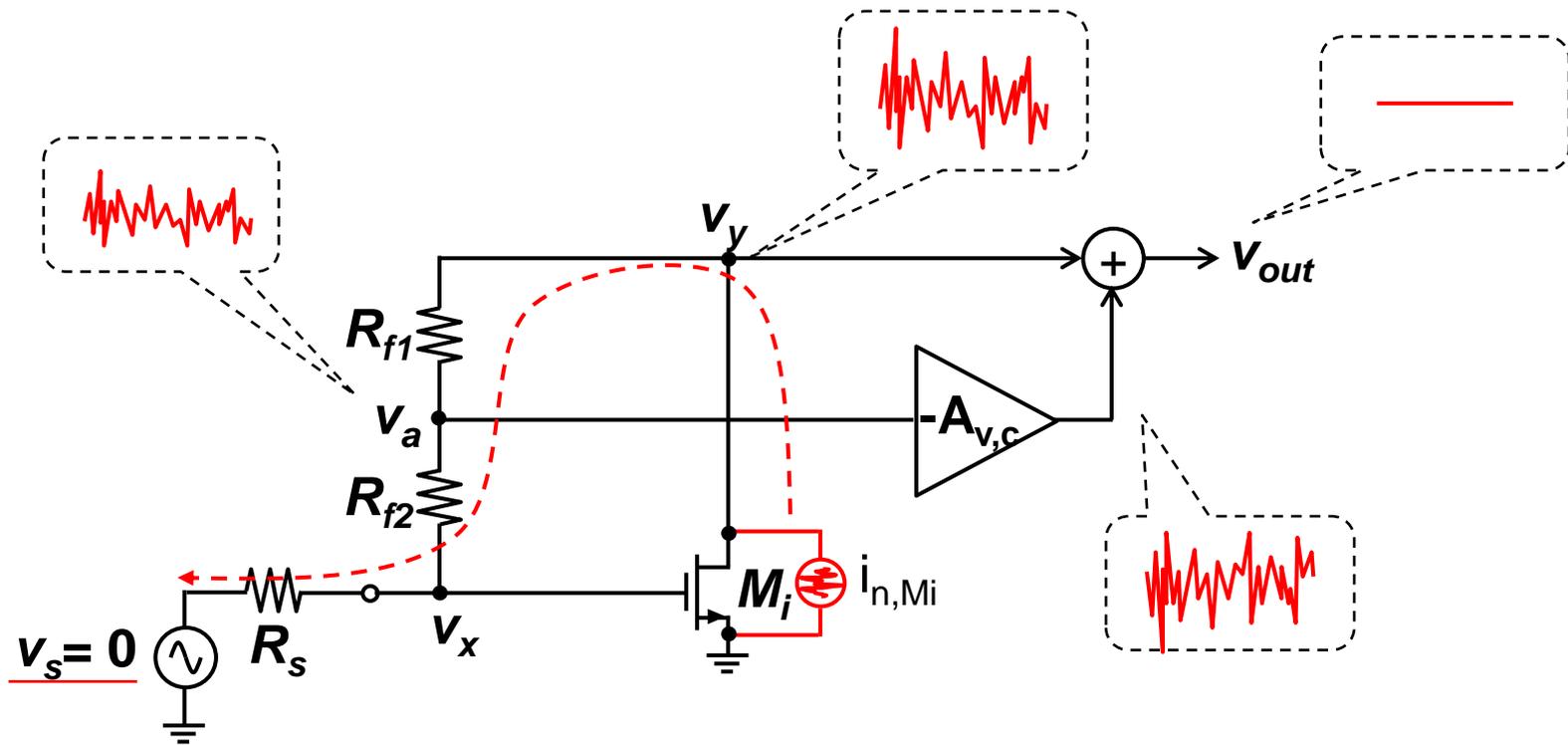
$A_{v,c}$ によるノイズキャンセル

R_{f2} による $A_{v,c}$ の小信号入力 v_a の抑制

$A_{v,c}$ で発生する消費電力を抑える

消費電力を抑えつつ、低雑音化を目指す

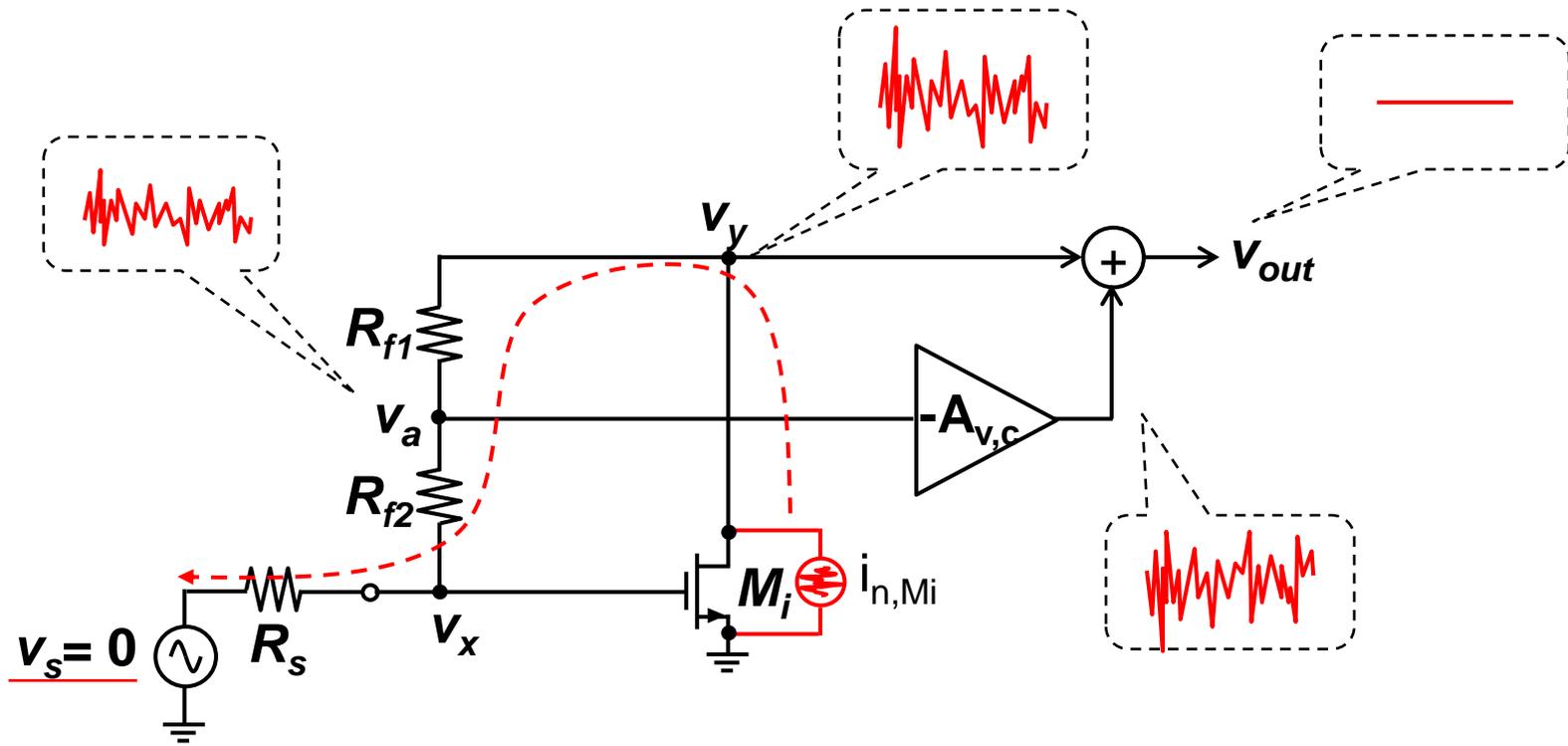
- ・研究背景と目的
- ・信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術
 - －概要
 - －雑音解析
 - －歪み解析
 - －信号抑制技術
- ・シミュレーション
 - －動作確認
 - －設計例
- ・まとめと今後の課題



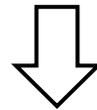
M_i のノイズ電流 $i_{n, Mi}$ のみを入力として各ノードの雑音電圧を計算

$$\begin{cases} v_{n,a, Mi} = (R_s + R_{f2}) i_{n, Mi} \\ v_{n,y, Mi} = (R_s + R_{f1} + R_{f2}) i_{n, Mi} \\ v_{n,out, Mi} = v_{n,y, Mi} + (-A_{v,c}) v_{n,a, Mi} \end{cases}$$

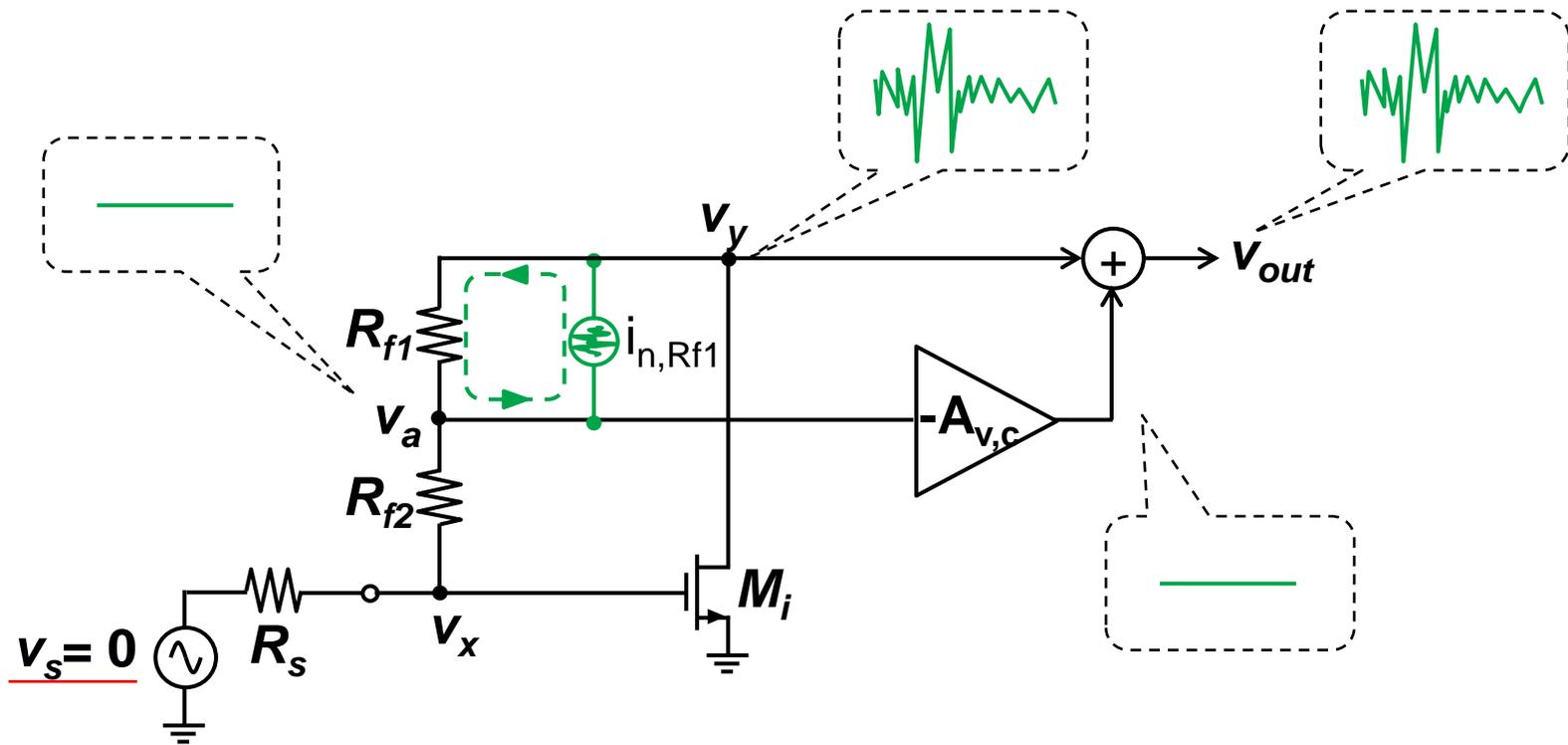
$$\longrightarrow v_{n,out, Mi} = \{(R_s + R_{f1} + R_{f2}) - A_{v,c}(R_s + R_{f2})\} i_{n, Mi}$$



$$v_{n,out,Mi} = \{(R_S + R_{f1} + R_{f2}) - A_{v,c}(R_S + R_{f2})\}i_{n,Mi} = 0 \text{ とする } A_{v,c} \text{ を } A_{v,c,Mi}$$



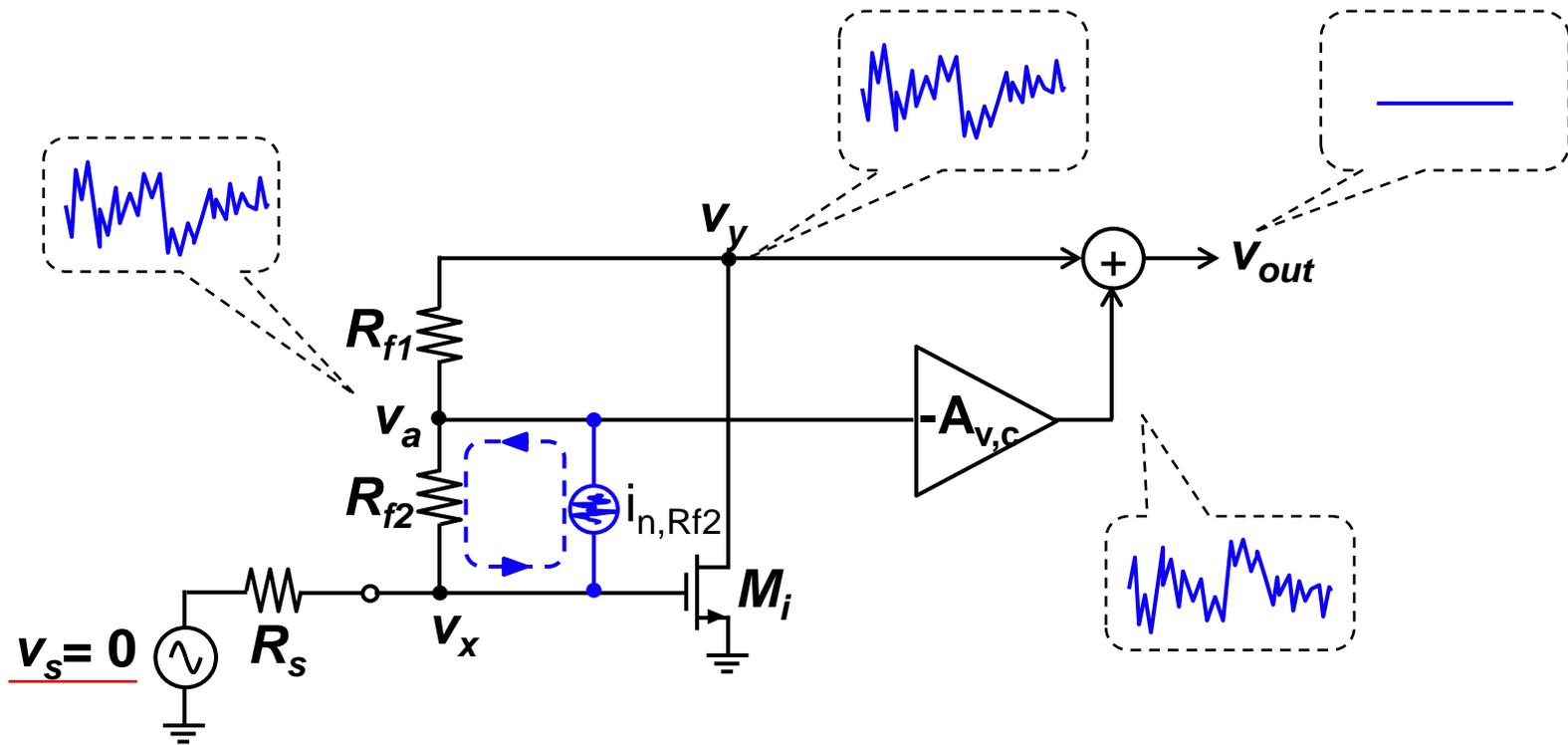
$$A_{v,c,Mi} = \frac{R_S + R_{f1} + R_{f2}}{R_S + R_{f2}} = 1 + \frac{R_{f1}}{R_S + R_{f2}} \quad \dots M_i \text{ のノイズキャンセリング条件}$$



R_{f1} のノイズ電流 $i_{n,Rf1}$ のみを入力として各ノードの雑音電圧を計算

$$\begin{cases} v_{n,a,Rf1} = 0 \cdots R_{f2} \text{ や } R_s \text{ に電流が流れないため} \\ v_{n,y,Rf1} = R_{f1} i_{n,Rf1} \\ v_{n,out,Rf1} = v_{n,y,Rf1} + (-A_{v,c}) v_{n,a,Rf1} \end{cases}$$

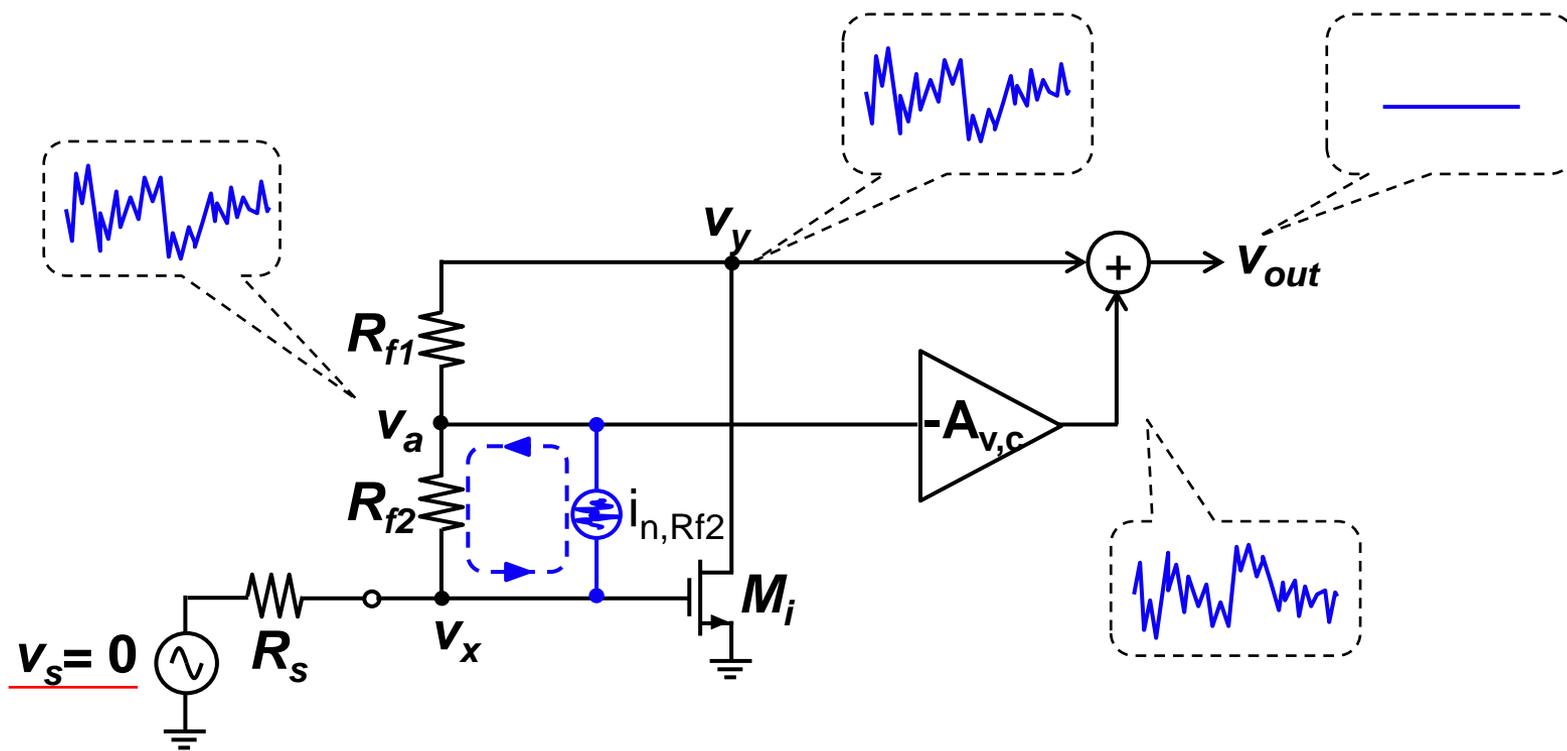
$$\rightarrow v_{n,out,Rf1} = R_{f1} i_{n,Rf1} \cdots \underline{R_{f1} \text{ のノイズは1倍で出力}}$$



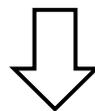
R_{f2} のノイズ電流 $i_{n,Rf2}$ のみを入力として各ノードの雑音電圧を計算

$$\begin{cases} v_{n,a,Rf2} = R_{f2}i_{n,Rf2} + v_x = R_{f2}i_{n,Rf2} & \cdots R_s \text{に電流が流れないため} \\ v_{n,y,Rf2} = v_{n,a,Rf2} = R_{f2}i_{n,Rf2} & \cdots R_{f1} \text{に電流が流れないため} \\ v_{n,out,Rf2} = v_{n,y,Rf2} + (-A_{v,c})v_{n,a,Rf2} \end{cases}$$

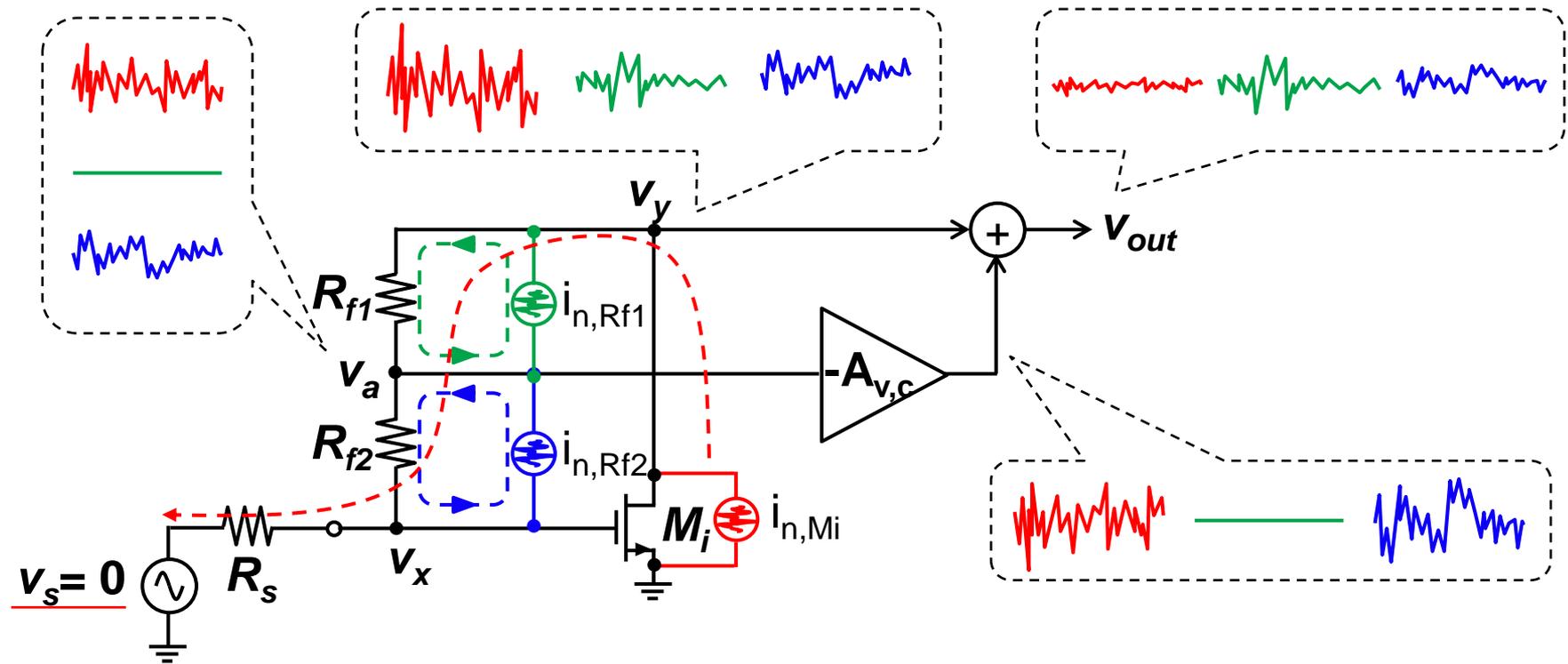
$$\hookrightarrow v_{n,out,Rf2} = (1 - A_{v,c})R_{f2}i_{n,Rf2}$$



$$v_{n,out,Rf2} = (1 - A_{v,c})R_{f2}i_{n,Rf2} = 0 \text{ とする } A_{v,c} \text{ を } A_{v,c,Rf2}$$



$$A_{v,c,Rf2} = 1 \quad \dots R_{f2} \text{ のノイズキャンセリング条件}$$



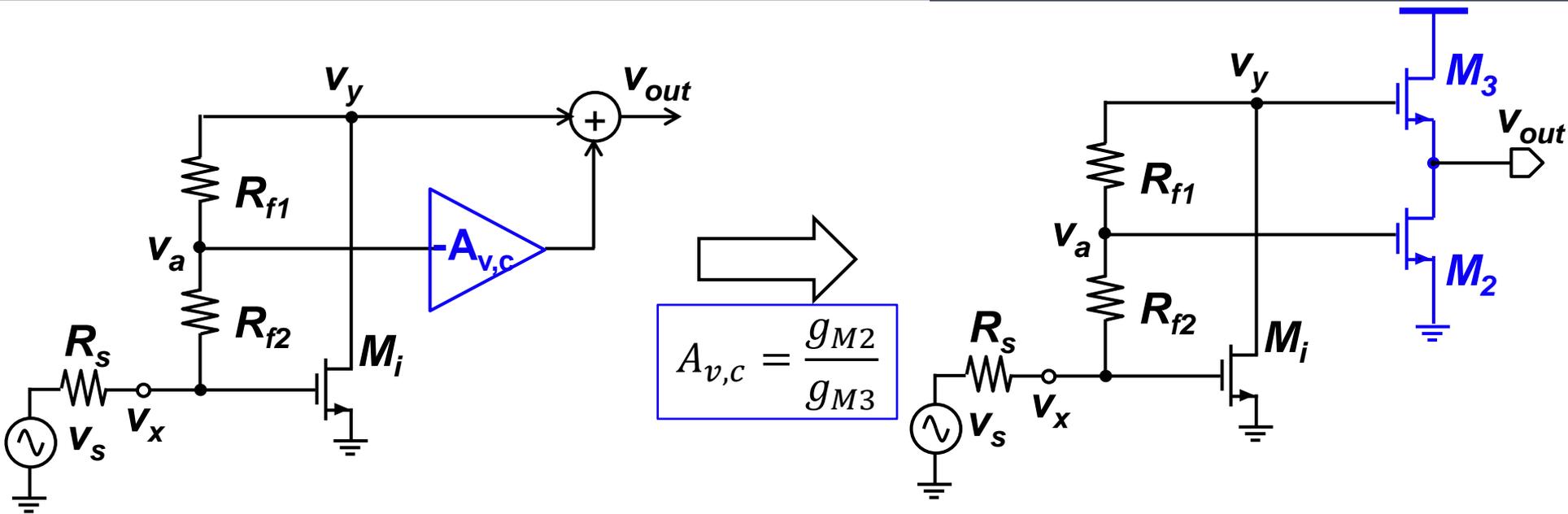
入力として $i_{n,Mi}$ と $i_{n,Rf1}$ と $i_{n,Rf2}$ を考えた場合

$$|v_{n,out}|^2 = 4kTB \left\{ |R_s + R_{f1} + R_{f2} - A_{v,c}(R_s + R_{f2})|^2 \gamma g_{Mi} + R_{f1} + |1 - A_{v,c}|^2 R_{f2} \right\}$$



$$A_{v,c,all} = \frac{(R_s + R_{f1} + R_{f2})(R_s + R_{f2})\gamma g_{Mi} + R_{f2}}{(R_s + R_{f2})^2 \gamma g_{Mi} + R_{f2}} \quad \text{で } |v_{n,out}|^2 \text{ が最少}$$

(トータルのノイズキャンセル条件)



$$F = 1 + F_{M_i} + F_{R_{f1}} + F_{R_{f2}} + F_{(g_{M2}+g_{M3})}$$

$$F_{M_i} = \left| \frac{R_s + R_{f1} + R_{f2} - A_{v,c}(R_s + R_{f2})}{A_{v,core}} \right|^2 \frac{\gamma g_{M_i}}{R_s}$$

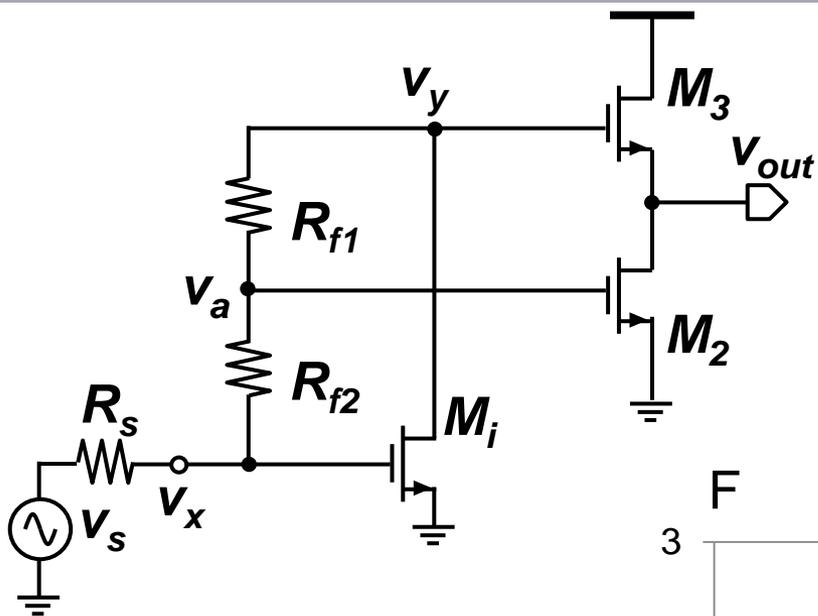
$$F_{R_{f1}} = \left| \frac{1 + g_{M_i} R_s}{A_{v,core}} \right|^2 \frac{R_{f1}}{R_s}$$

$$F_{R_{f2}} = \left| \frac{(1 + g_{M_i} R_s)(1 - A_{v,c})}{A_{v,core}} \right|^2 \frac{R_{f2}}{R_s}$$

$$\text{※ } A_{v,c} = \frac{g_{M2}}{g_{M3}}$$

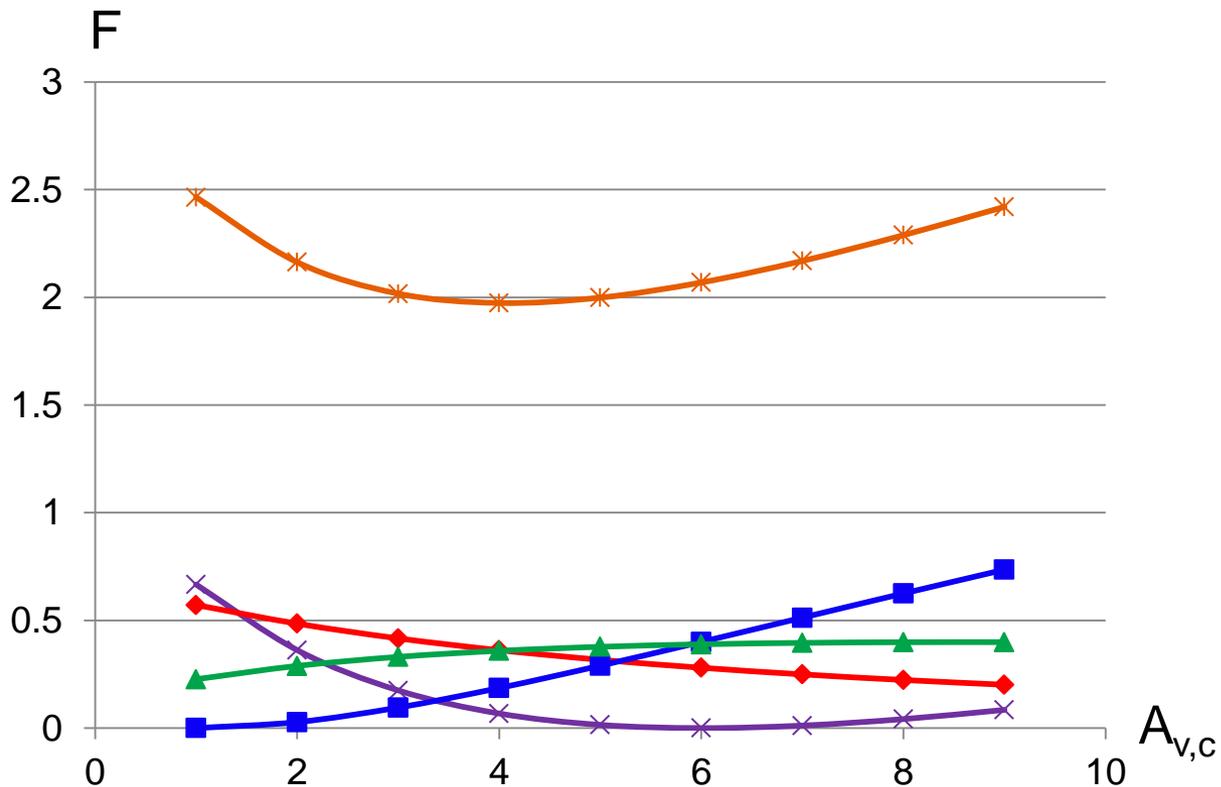
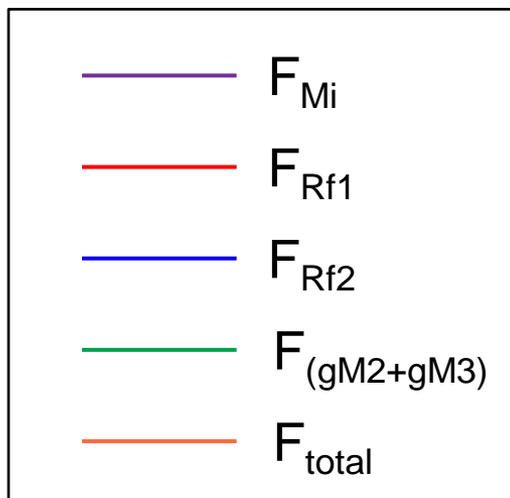
$$A_{v,core} = \frac{v_y}{v_x} = 1 - (R_{f1} + R_{f2}) g_{m_i}$$

$$F_{(g_{M2}+g_{M3})} = \left| \frac{1 + g_{M_i} R_s}{g_{M3} A_{v,core}} \right|^2 \frac{\gamma (g_{M2} + g_{M3})}{R_s}$$

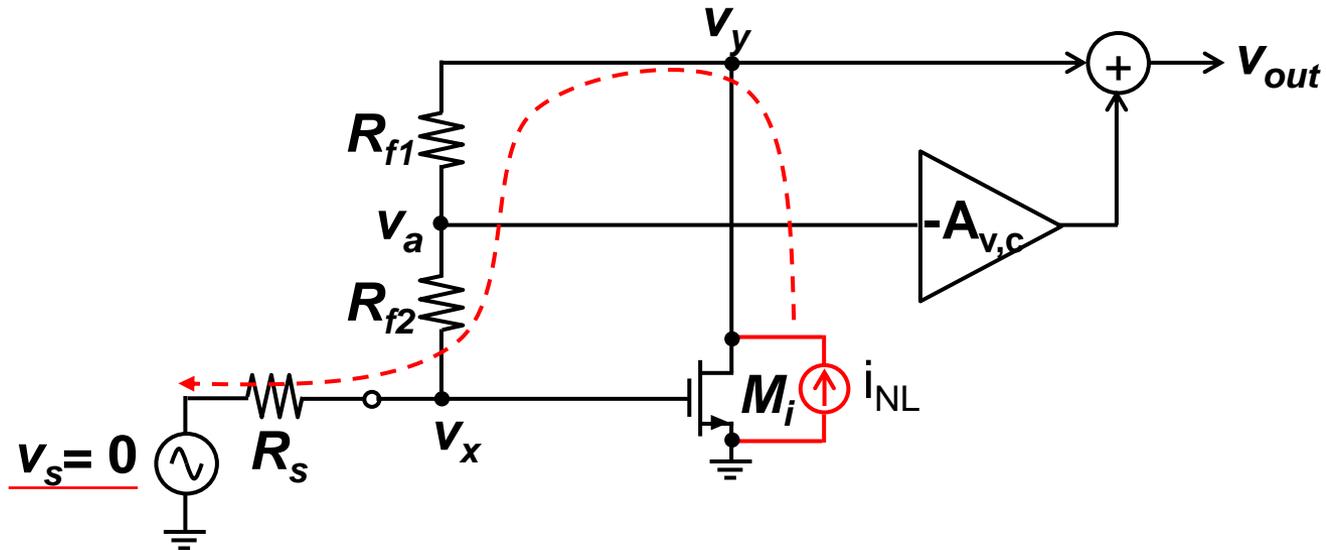


$$F = 1 + F_{Mi} + F_{Rf1} + F_{Rf2} + F_{(gM2+gM3)}$$

$R_{f1}=350\Omega$, $R_{f2}=20\Omega$, $g_{Mi}=20\text{mS}$,
 $R_S=50\Omega$, $g_{M2}=9.6\text{mS}$,
 g_{M3} を変動で $A_{v,c}=g_{M2}/g_{M3}$ を変化



- ・研究背景と目的
- ・信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術
 - －概要
 - －雑音解析
 - －歪み解析
 - －信号抑制技術
- ・シミュレーション
 - －動作確認
 - －設計例
- ・まとめと今後の課題

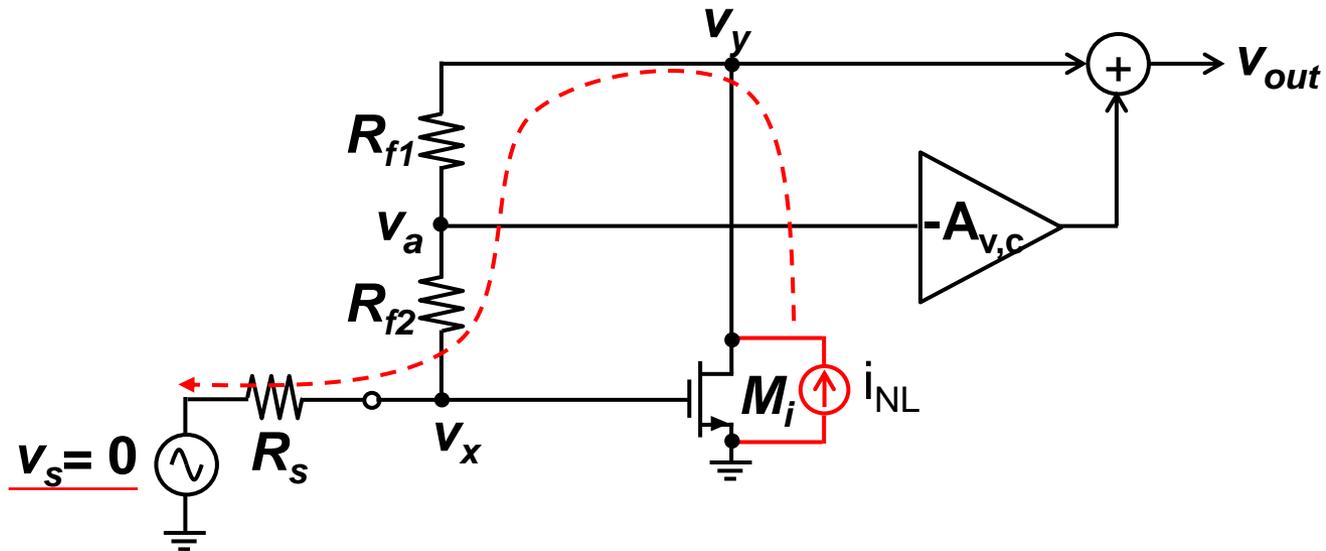


M_i の非線形電流 i_{NL} のみを入力として各ノードの電圧を計算

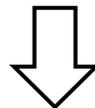
$$\ast i_{DS} = g_{Mi}v_x + \alpha_1 v_x^2 + \alpha_2 v_x^3 + \dots = g_{Mi}v_x + \underline{I_{NL}}$$

$$\begin{cases} v_{NL,a} = (R_S + R_{f2})i_{NL} \\ v_{NL,y} = (R_S + R_{f1} + R_{f2})i_{NL} \\ v_{NL,out} = v_{NL,y} + (-A_{v,c})v_{NL,a} \end{cases}$$

$$\hookrightarrow v_{NL,out} = \{(R_S + R_{f1} + R_{f2}) - A_{v,c}(R_S + R_{f2})\}i_{NL}$$

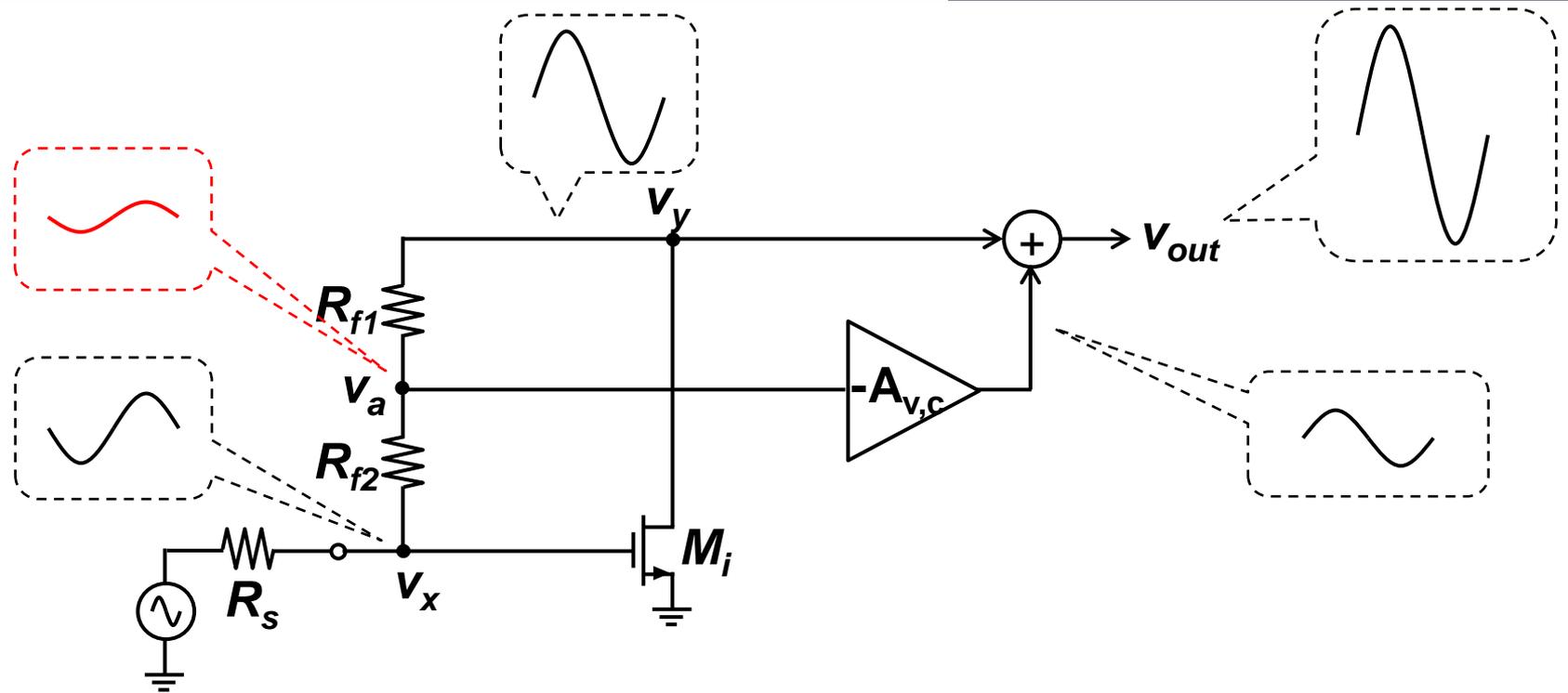


$$v_{NL,out} = \{(R_S + R_{f1} + R_{f2}) - A_{v,c}(R_S + R_{f2})\}i_{NL,Mi} = 0 \text{ とする } A_{v,c} \text{ を } A_{v,c,NL}$$



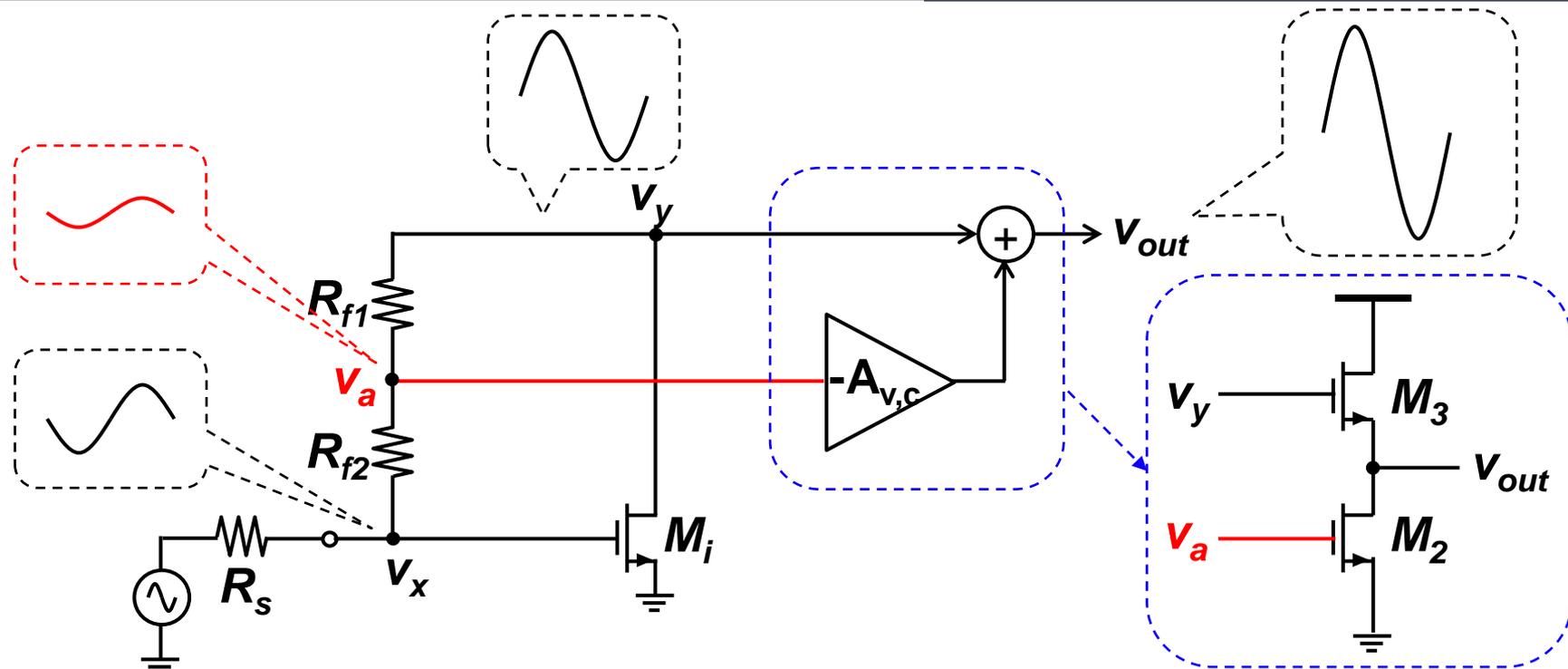
$$A_{v,c,NL} = \frac{R_S + R_{f1} + R_{f2}}{R_S + R_{f2}} = 1 + \frac{R_{f1}}{R_S + R_{f2}} \quad \dots M_i \text{ の歪みキャンセル条件}$$

- ・研究背景と目的
- ・信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術
 - －概要
 - －雑音解析
 - －歪み解析
 - －信号抑制技術
- ・シミュレーション
 - －動作確認
 - －設計例
- ・まとめと今後の課題



抵抗 R_{f2} によってノイズキャンセルアンプ $A_{v,c}$ への小信号入力 v_a を抑える

ノイズキャンセルアンプ $A_{v,c}$ の消費電力を低減
(雑音性能と消費電力間で自由度を持つ)



信号抑制により v_a へ入力される小信号を抑制

M2による非線形成分の考慮が減る

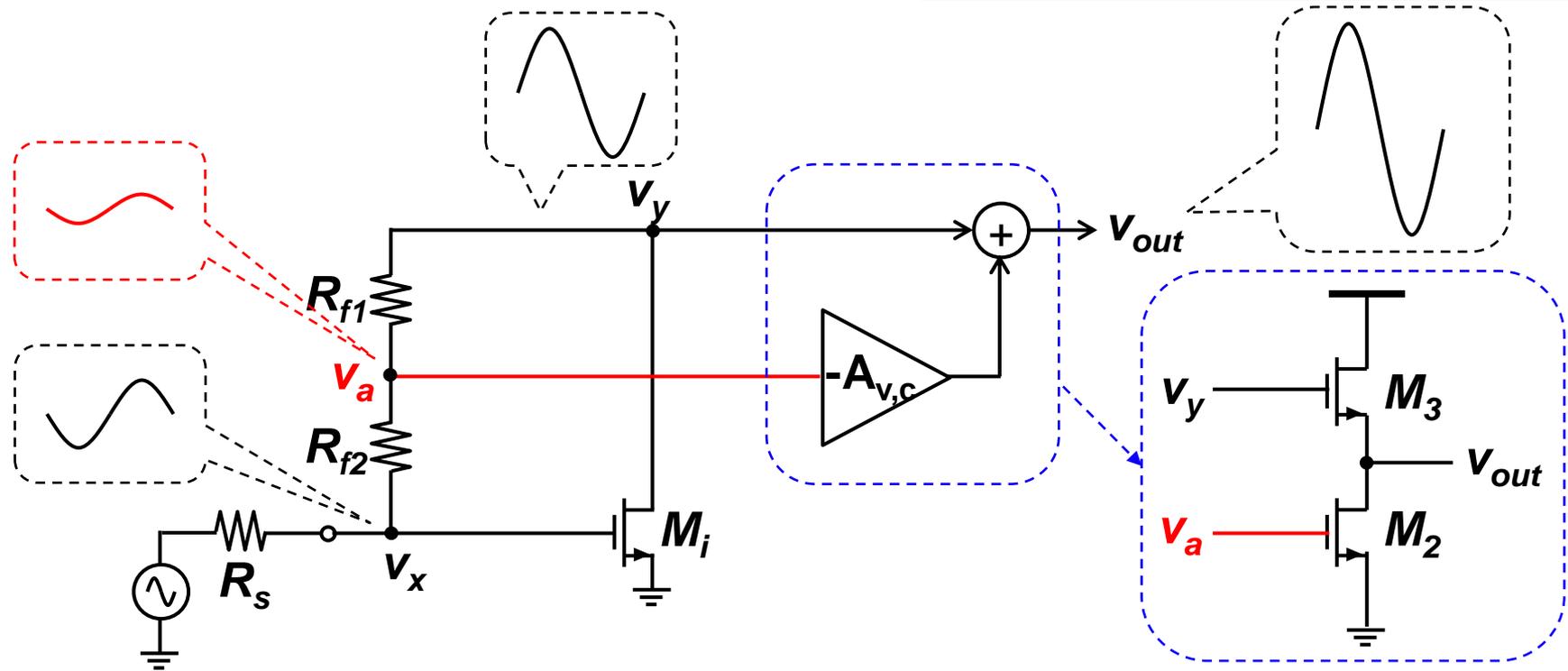
$V_{GS,M2}$ を下げる事ができる

(※キャンセル段の消費電力はM2のIDに依存)

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}}$$

↓
 $g_m = \text{一定のとき、}$
 $V_{GS} - V_{TH} \rightarrow \text{小で } I_D \rightarrow \text{小}$

信号抑制技術によりノイズキャンセルアンプ $A_{v,c}$ の消費電力を抑制



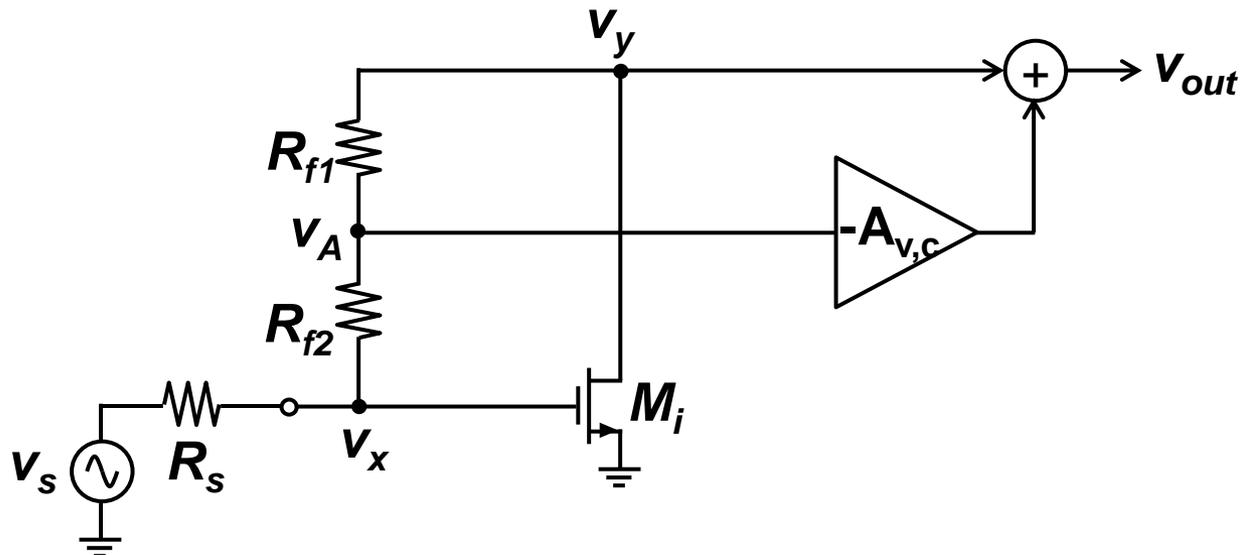
$$v_a = (1 - R_{f2}g_{Mi})v_x$$



$0 < R_{f2}g_{Mi} < 2$ で $|v_a| < |v_x|$ となる

(※ノードaの小信号と雑音の関係により実際に使えるのは $0 < R_{f2}g_{Mi} \leq 1$)

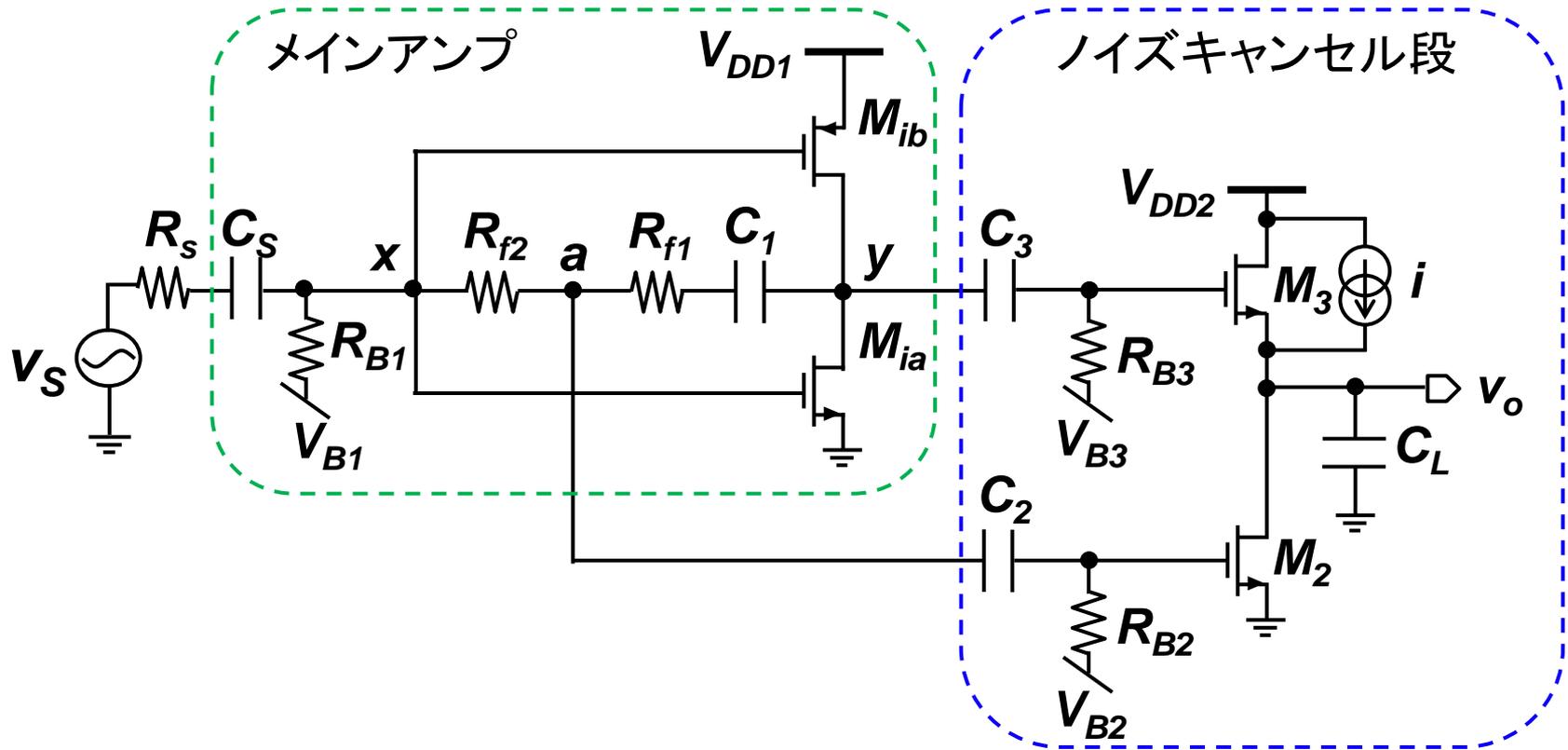
($1 < R_{f2}g_{Mi} < 2$ の範囲では v_a が v_x と逆位相になる)



😊	ノイズ性能	😞
😞	電力	😊
😐	線形性	😐

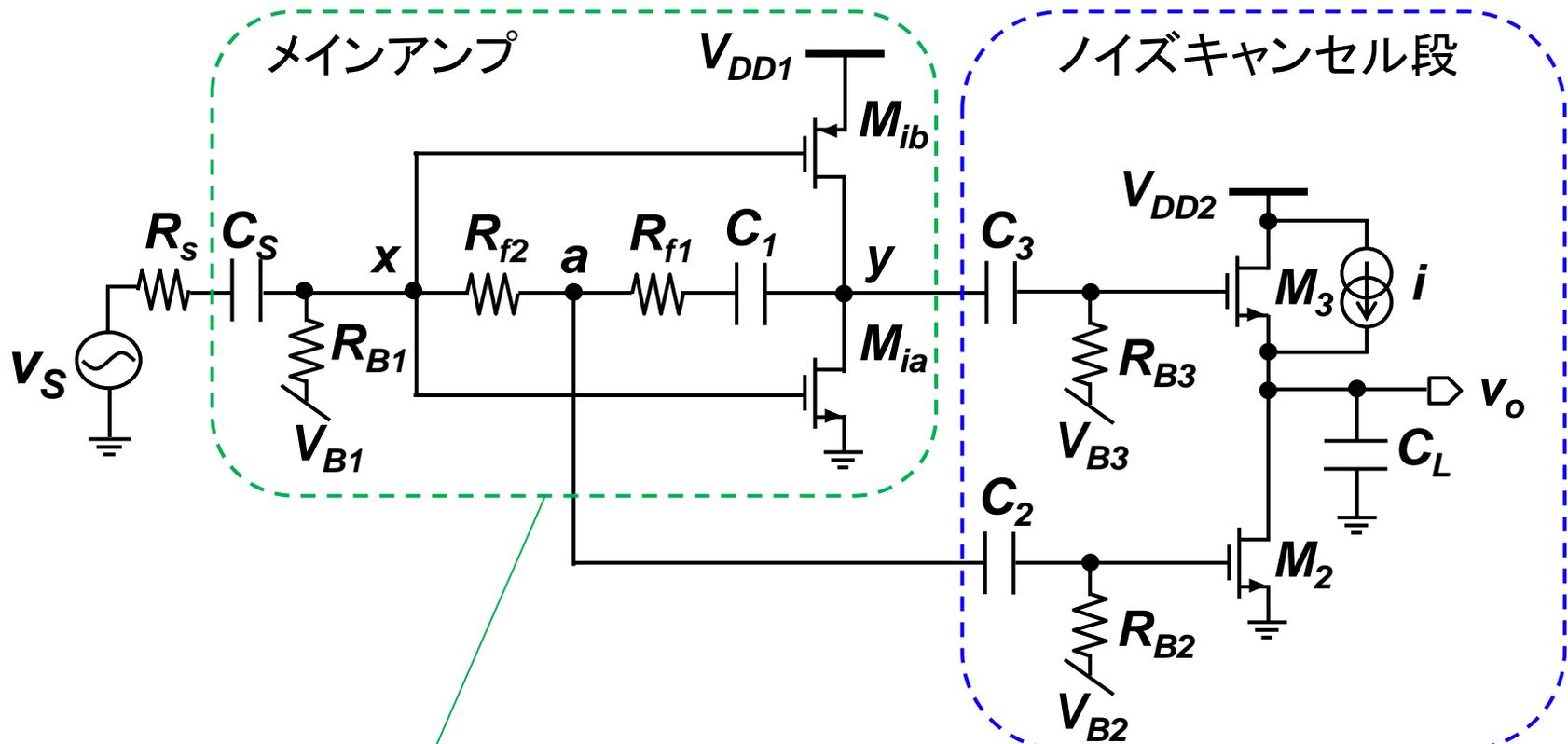
※ $R_{f1} + R_{f2} = \text{一定とする}$

- ・研究背景と目的
- ・信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術
 - －概要
 - －雑音解析
 - －歪み解析
 - －信号抑制技術
- ・シミュレーション
 - －動作確認
 - －設計例
- ・まとめと今後の課題



$\bullet R_{f2}, A_{v,c} = g_{M2}/g_{M3}$ を変化させたときの $\left\{ \begin{array}{l} \text{ノイズキャンセル効果(NF)} \\ \text{歪みキャンセル効果(IIP3)} \end{array} \right.$ の確認

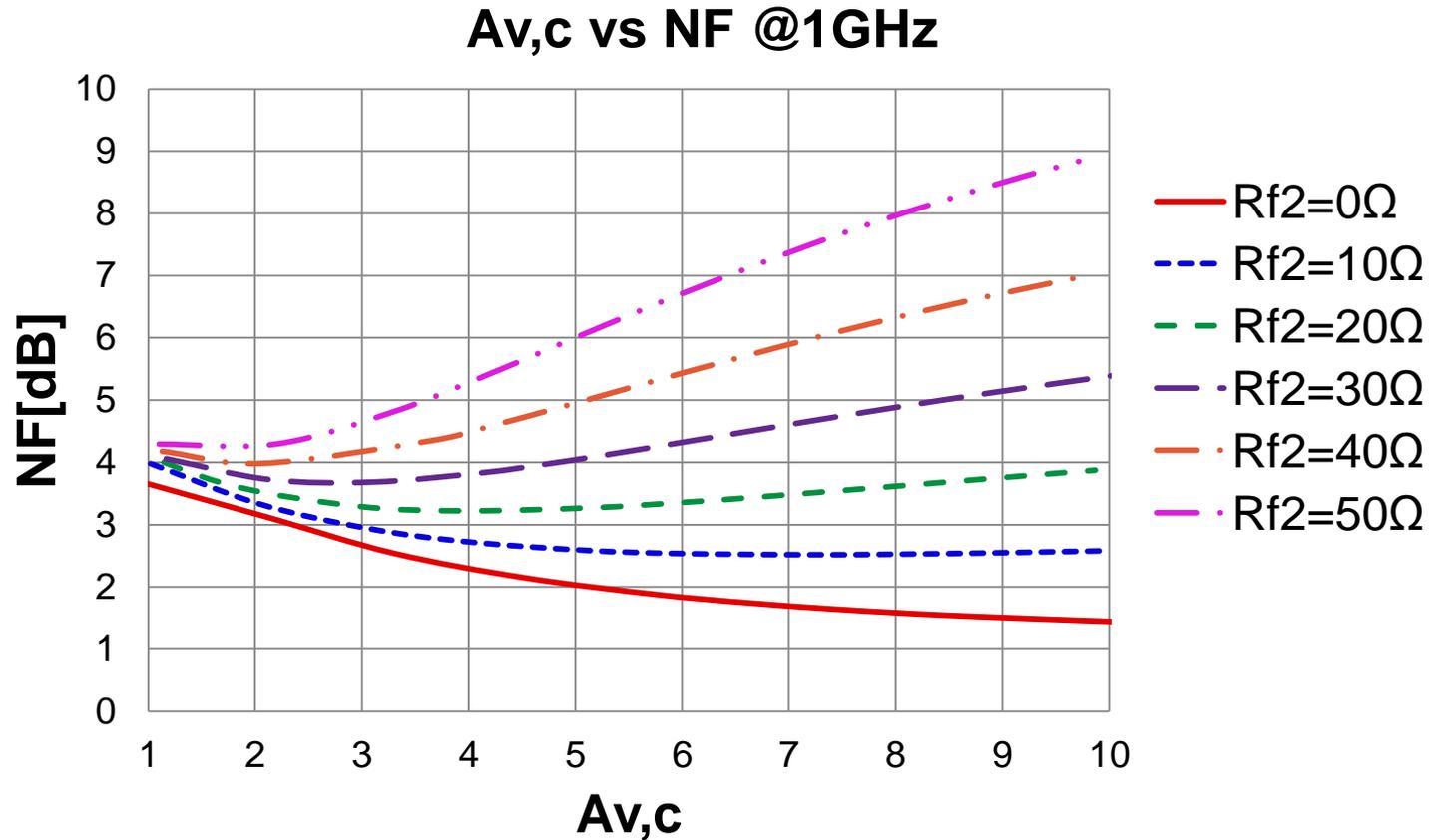
\bullet 各 R_{f2} のノイズキャンセル点におけるNFと消費電力の比較



$M_{ia}=M_{ib}=W/L=47\mu\text{m}/130\text{nm}$
 $R_{f1}+R_{f2}=370\Omega$ で R_{f2} を変化
 $V_{DD1}=1.2\text{V}$, $V_{B1}=550\text{mV}$ $R_{B1}=50\text{k}\Omega$
 $C_s=C_1=1\text{nF}$

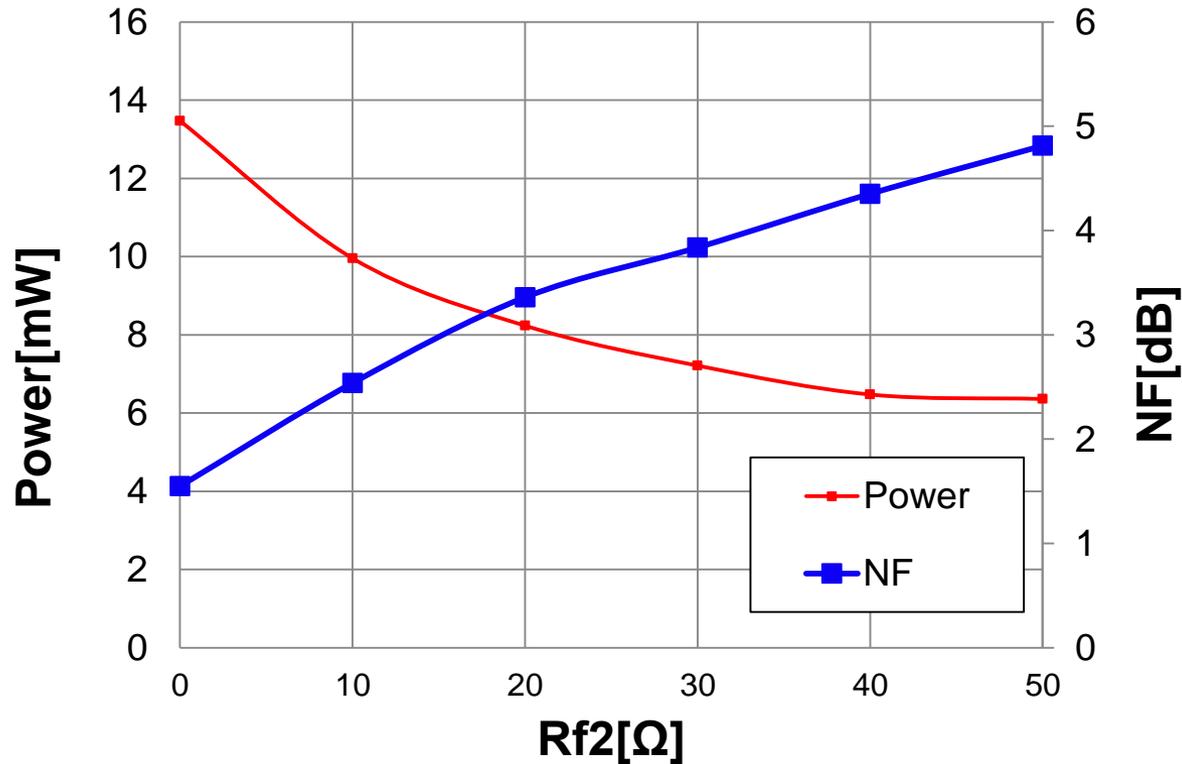
tsmc 90nm CMOSプロセスを使用

$M_3=W/L=25\mu\text{m}/130\text{nm}$
 $M_2=W/L$ 変化, i =調整
 $V_{DD2}=1.2\text{V}$, $V_{B3}=1\text{V}$, V_{B2} =調整,
 $R_{B2}=R_{B3}=50\text{k}\Omega$
 $C_2=C_3=1[\text{nF}]$



- $A_{v,c}$ によるノイズキャンセル効果
- R_{f2} によるノイズキャンセル点の変化
- R_{f2} によるNFの変化

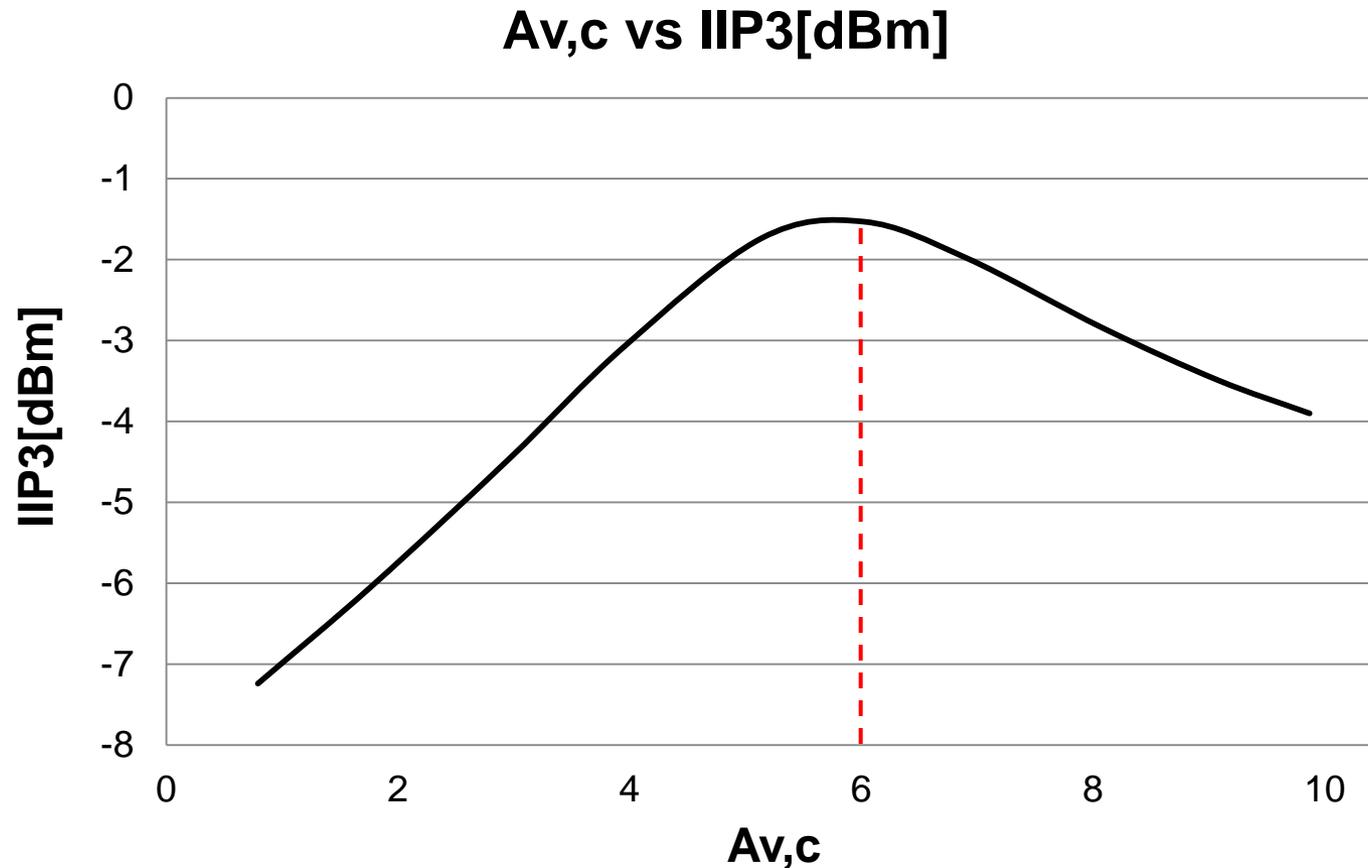
Av,c vs 消費電力、NF



R_{f2} によるNFと消費電力間のトレードオフの関係

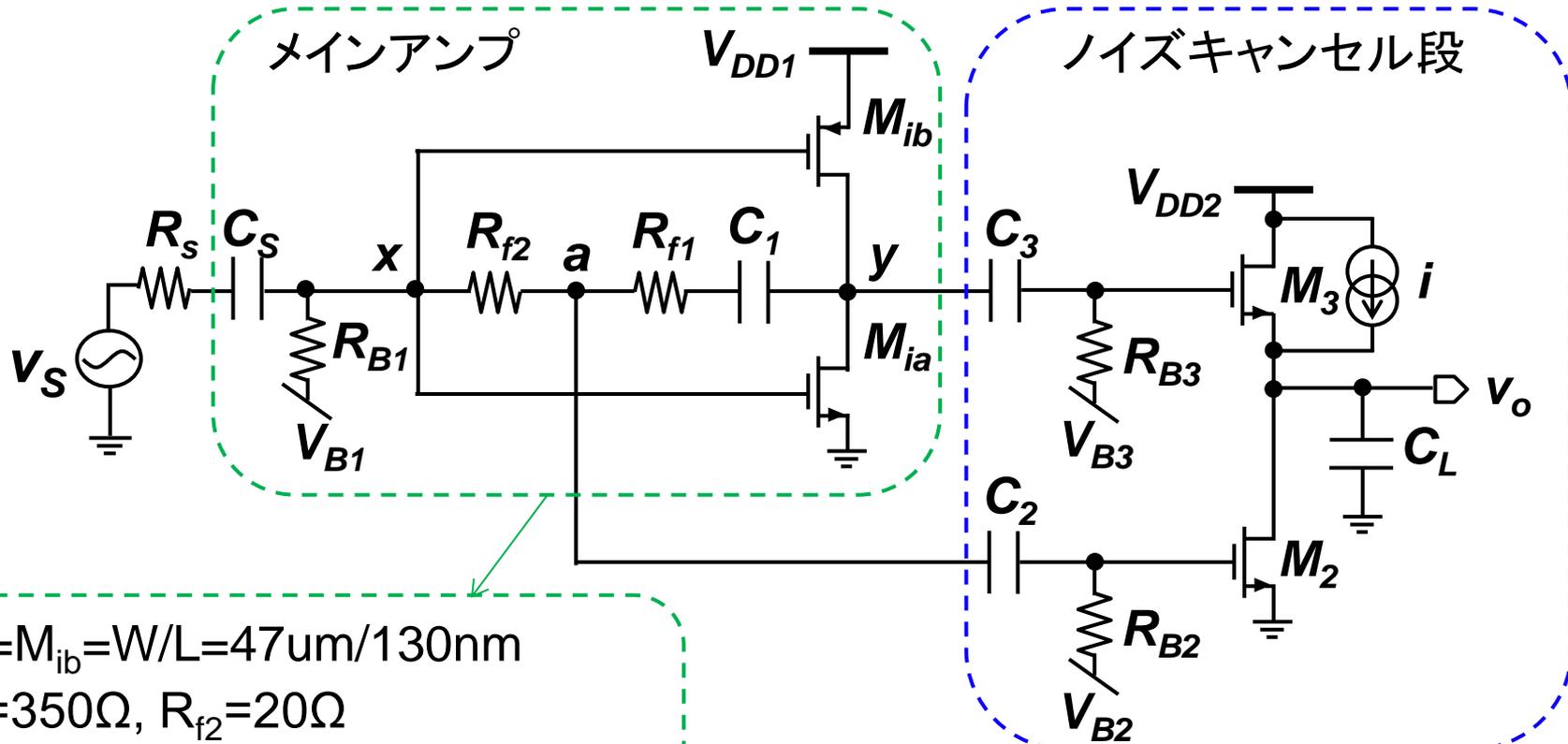
※ $A_{v,c}$ は各 R_{f2} のノイズキャンセル条件を満たしたときの値

$$A_{v,c,all} = \frac{(R_S + R_{f1} + R_{f2})(R_S + R_{f2})\gamma g_{Mi} + R_{f2}}{(R_S + R_{f2})^2 \gamma g_{Mi} + R_{f2}}$$



$A_{v,c}$ による歪みキャンセルを確認(キャンセル条件 $A_{v,c}=6$)
(※IIP3は849MHzと851MHzを入力したときの基本波:849MHzとIM3:847MHz)

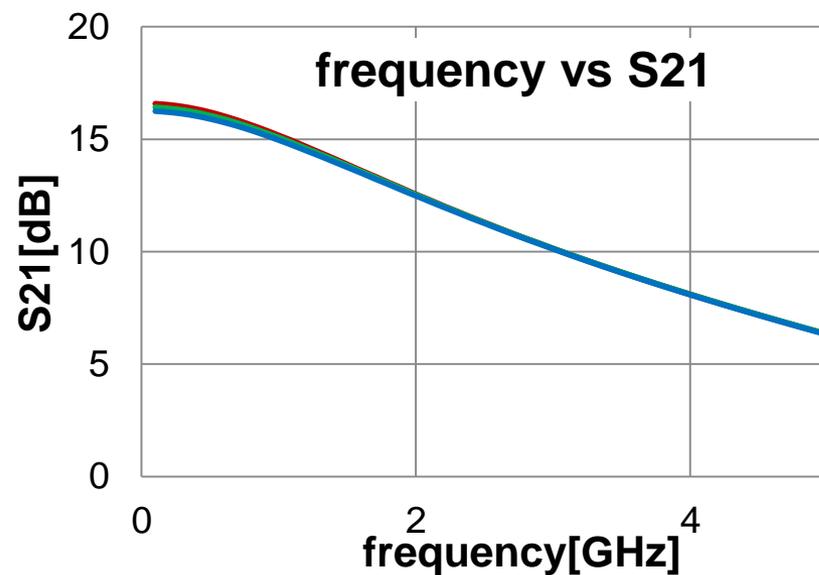
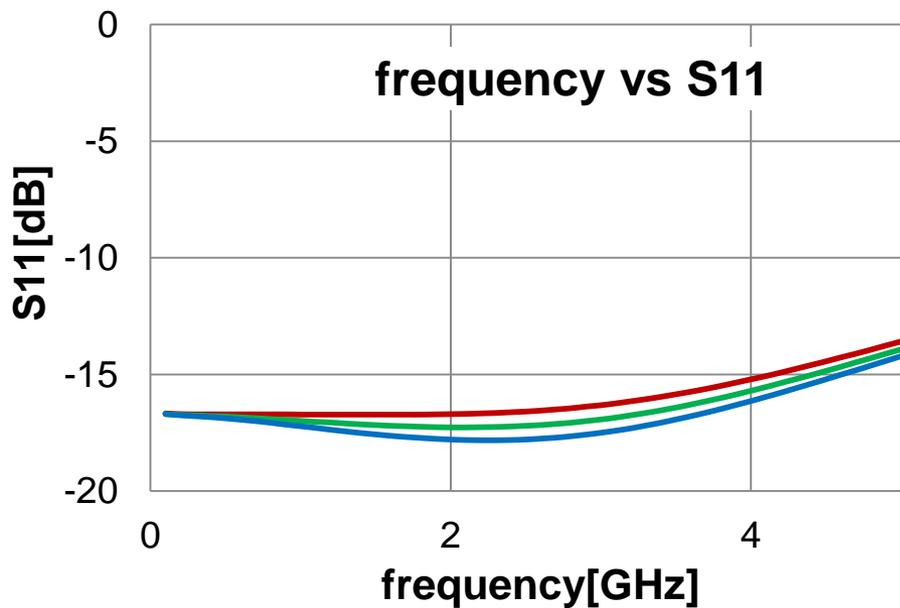
- ・研究背景と目的
- ・信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術
 - －概要
 - －雑音解析
 - －歪み解析
 - －信号抑制技術
- ・シミュレーション
 - －動作確認
 - －設計例
- ・まとめと今後の課題



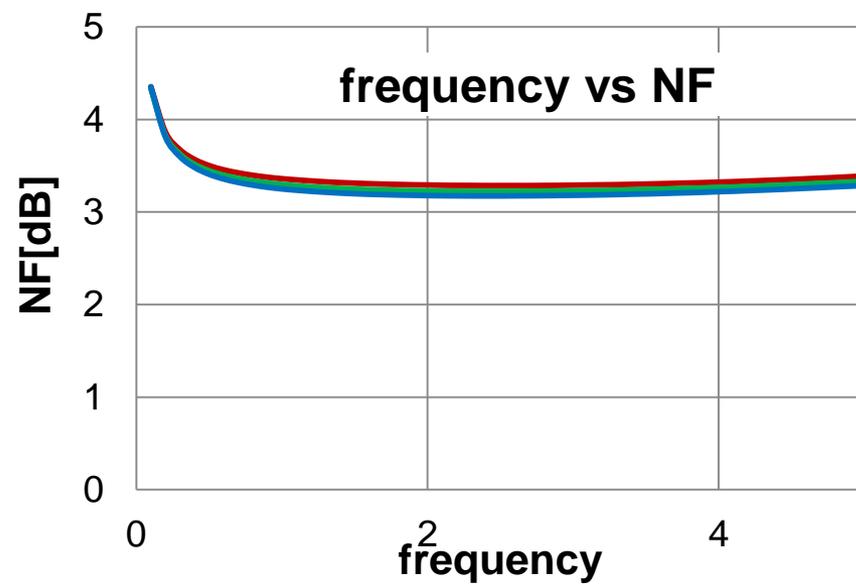
$M_{ia}=M_{ib}=W/L=47\mu\text{m}/130\text{nm}$
 $R_{f1}=350\Omega, R_{f2}=20\Omega$
 $V_{DD1}=1.2\text{V}, V_{B1}=550\text{mV}, R_{B1}=50\text{k}\Omega$
 $C_s=C_1=1\text{nF}$

$M_3=W/L=25\mu\text{m}/130\text{nm}$
 $M_2=W/L=245\mu\text{m}/130\text{nm},$
 $305\mu\text{m}/130\text{nm}, 275\mu\text{m}/130\text{nm}$
 $i=\text{調整},$
 $V_{DD2}=1.2\text{V}, V_{B3}=1\text{V}, V_{B2}=\text{調整},$
 $R_{B2}=R_{B3}=50\text{k}\Omega, C_2=C_3=1[\text{nF}]$

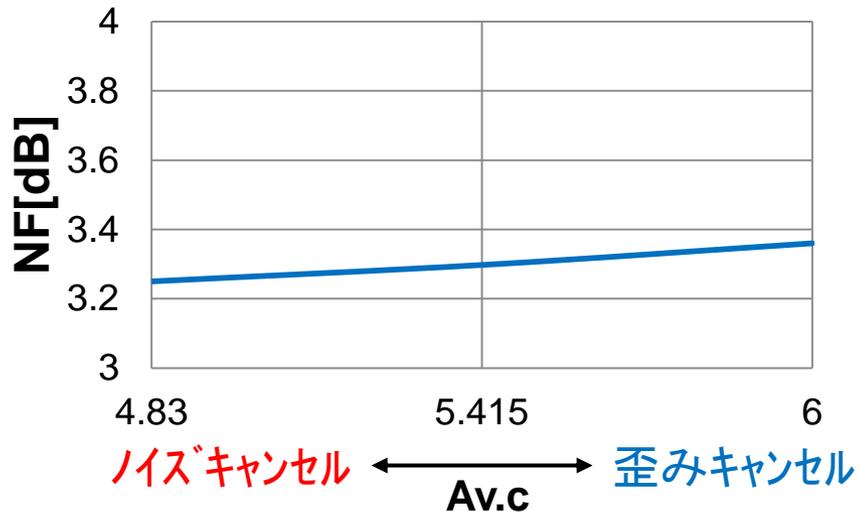
M_2 は(ノイズキャンセル点,
 歪みキャンセル点, その中間)で
 シミュレーション



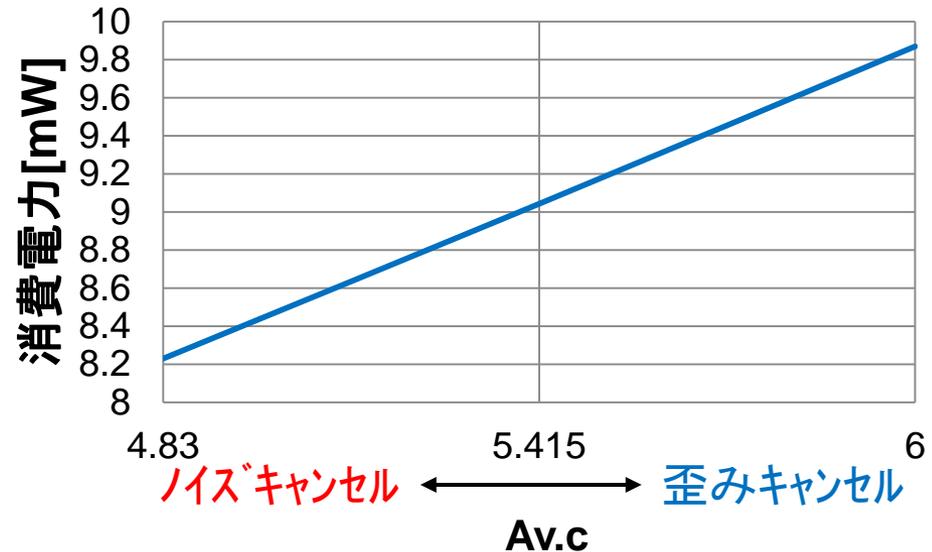
- $A_{v,c}=4.83$ (ノイズキャンセル条件)
- $A_{v,c}=6$ (歪みキャンセル条件)
- $A_{v,c}=5.42$ (中間値)



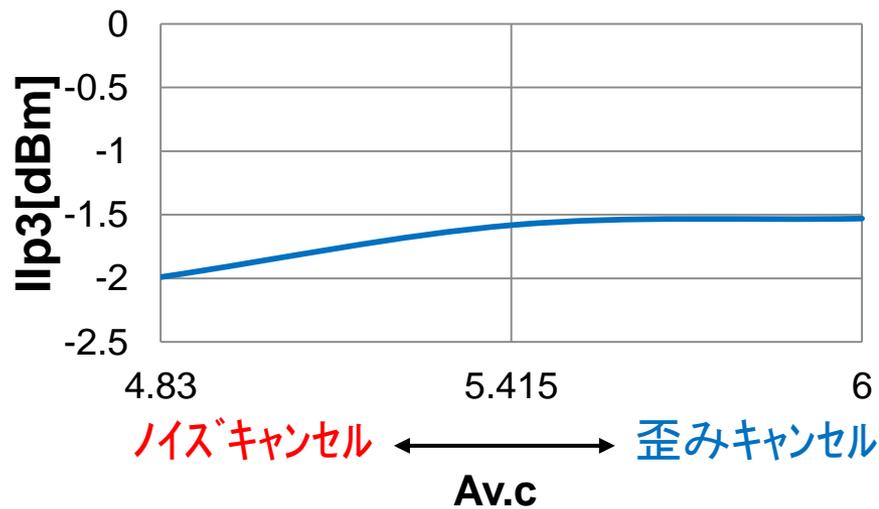
NF(1GHz)



消費電力



IIP3



$A_{v,c}$ をノイズキャンセル条件に寄せる
⇒低NF、低消費電力実現

$A_{v,c}$ を歪みキャンセル条件に寄せる
⇒IIP3の改善(小)

- ・研究背景と目的
- ・信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術
 - －概要
 - －雑音解析
 - －歪み解析
 - －信号抑制技術
- ・シミュレーション
 - －動作確認
 - －設計例
- ・まとめと今後の課題

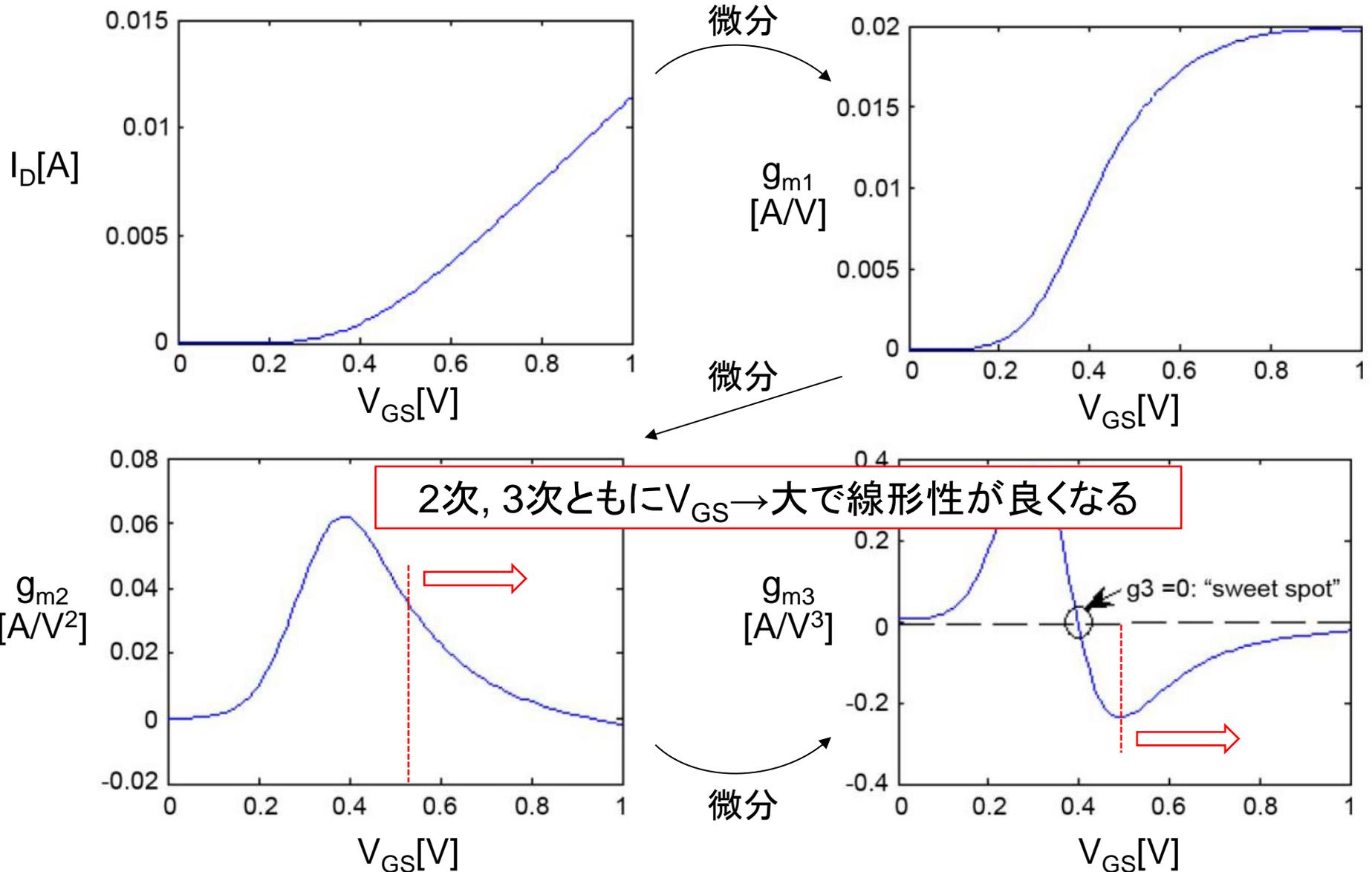
まとめ

- ・広帯域向けLNAの低消費電力・低雑音化技術として信号抑制フィードフォワードノイズキャンセル技術を提案した
- ・帰還抵抗 R_{f2} を調整することにより、雑音性能 - 消費電力間に自由度を与える
- ・ノイズキャンセル効果、低消費電力化、歪みキャンセル効果の確認した
- ・一設計例を挙げ、その周波数特性を示した

今後の課題

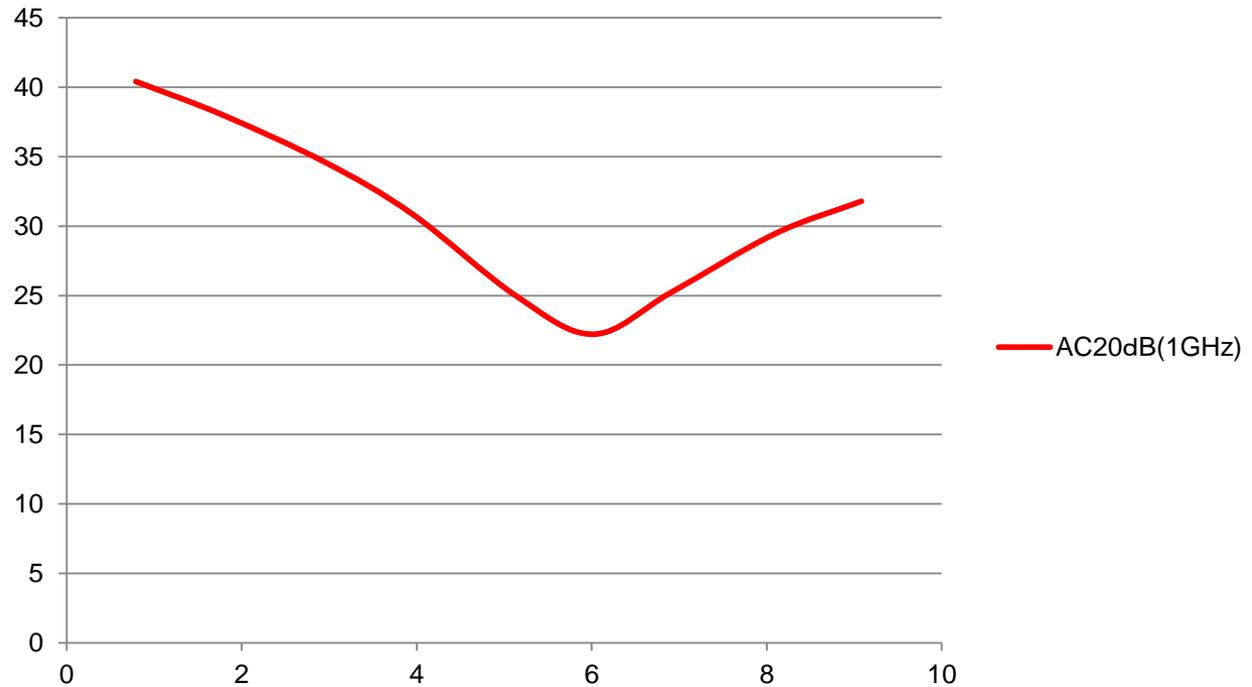
- ・設計の最適化
- ・帰還部の工夫

- [1] F. Bruccoleri, E. A. M. Klumperink, B. Nauta, “Wide-Band CMOS Low-Noise Amplifier Exploiting Thermal Noise Canceling,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol.39, no.2, pp.275-282 (Feb. 2004).
- [2] C.-F. Li, S.-C. Chou, G.-H. Ke, P.-C. Huang, “A Power-Efficient Noise Suppression Technique Using Signal-Nullled Feedback for Low-Noise Wideband Amplifiers,” *IEEE Trans on Circuits and Systems II: Express Brief*, vol.59, no.1, pp.1-5 (Jan. 2012).
- [3] C.-F. Li, S.-C. Chou, P.-C. Huang, “A Noise-Suppressed Amplifier with a Signal-Nullled Feedback for Wideband Applications”, *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference*, Fukuoka, Japan (Nov.2008)



Miに雑音電流源のモデルとして、Miと並列に交流電流源をつけてAC解析したものの

AC20dB(1GHz)



メインアンプ単体でのNF・・・1GHzで5.4~5.5dB

Q. 従来回路との利得の性能差はどのようになっているか

A. 従来回路はアンプ段+ノイズキャンセル段の二箇所で行っているのに対し、提案回路では信号抑制技術によりノイズキャンセル段の増幅は行わず、アンプ段の増幅のみとなるため、利得は従来回路のほうが高性能となる。

Q. 帰還抵抗 R_{f2} のノイズが出力に出てしまうということは、これ以上この回路での工夫は難しい。何か考えがあるのかどうか

A. 帰還抵抗とは別に信号抑制用のノードをキャパシタで作成するという方向を考え、実際にシミュレーション等を行いました。結果は今回のスライドに示しませんでした。やはり従来回路よりノイズが増えてしまう結果となりましたが、似たような方向性で検討は可能だと思われる。

Q. メインアンプ段、ノイズキャンセル段での増幅優先と消費電力のトレードオフは考えているか

A. メインアンプ段で優先的に増幅を行い、ノイズキャンセル段の増幅を抑えることで消費電力を抑える提案です。なので、ノイズキャンセル段に多少の信号増幅を任せ、メインアンプの消費電力を抑える方向の検討は行えておりません。

Q. メインアンプ段、ノイズキャンセル段での増幅優先と消費電力のトレードオフは考えているか

A. メインアンプ段で優先的に増幅を行い、ノイズキャンセル段の増幅を抑えることで消費電力を抑える提案です。なので、ノイズキャンセル段に多少の信号増幅を任せ、メインアンプの消費電力を抑える方向の検討は行えておりません。

