

トランスを用いたマルチバンド 低雑音増幅回路の研究

群馬大学 工学部 電気電子工学科
情報通信システム第2 小林研究室
神山雅貴

アウトライン

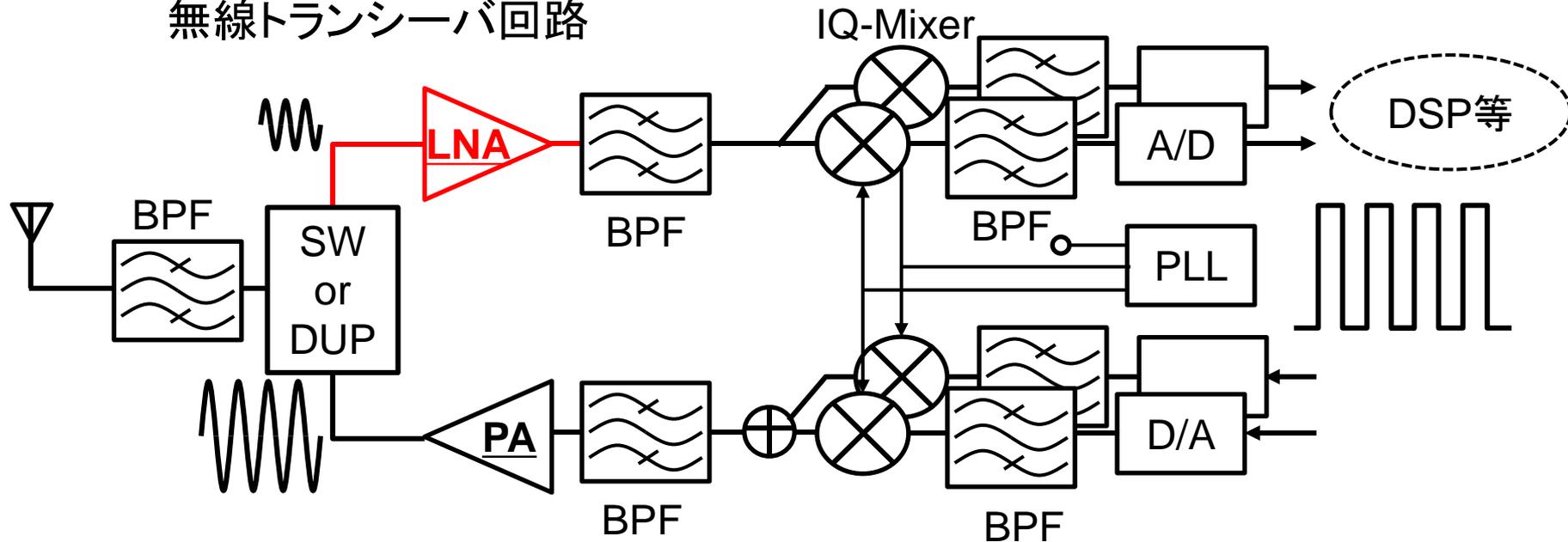
- Dual Band LNA
 - 研究内容
 - 回路構成と原理
 - シミュレーション
- Triple-Band LNA
 - 回路構成と原理
 - シミュレーション
- 考察
 - インダクタ・トランスのレイアウト考察

アウトライン

- Dual Band LNA
 - 研究内容
 - 回路構成と原理
 - シミュレーション
- Triple-Band LNA
 - 回路構成と原理
 - シミュレーション
- 考察
 - インダクタ・トランスのレイアウト考察

研究内容

無線トランシーバ回路



受信側

低雑音増幅器: **Low Noise Amplifier(LNA)**

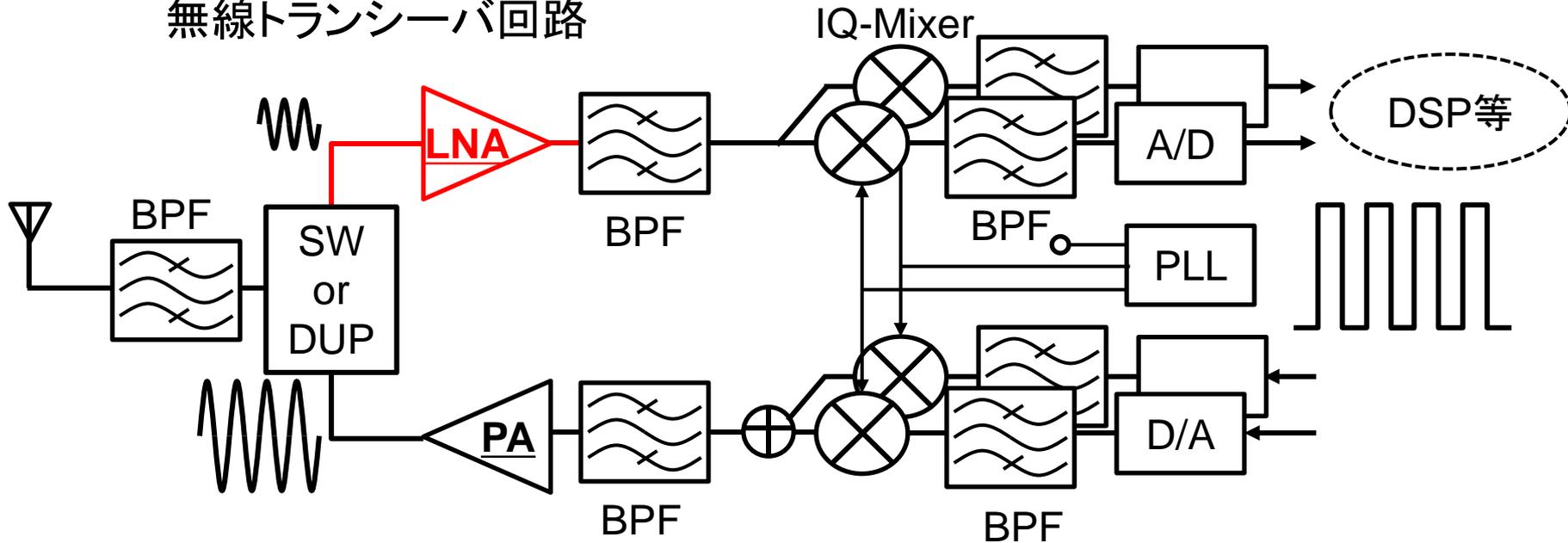
…後段で処理できるレベルまで、雑音・歪みを付加することなく信号を増幅する

課題

現在多くの無線規格が存在していることから 複数の信号の周波数に対応できる マルチバンド性能があるLNAが必要

研究内容

無線トランシーバ回路



マルチバンド性能をもつLNA

文献

デュアルバンドLNA

応用

研究成果

トリプルバンドLNA
を提案

調査論文

目的 狭帯域アンプのマルチバンド化を図る

トランスを用いたLNAのデュアルバンド化技術

- 調査文献

A Dual-Band 2.45/6 GHz CMOS LNA Utilizing a Dual-Resonant Transformer-Based Matching Network

- 著者

Nathan M.Neihart with Iowa University

Jeremy Brown

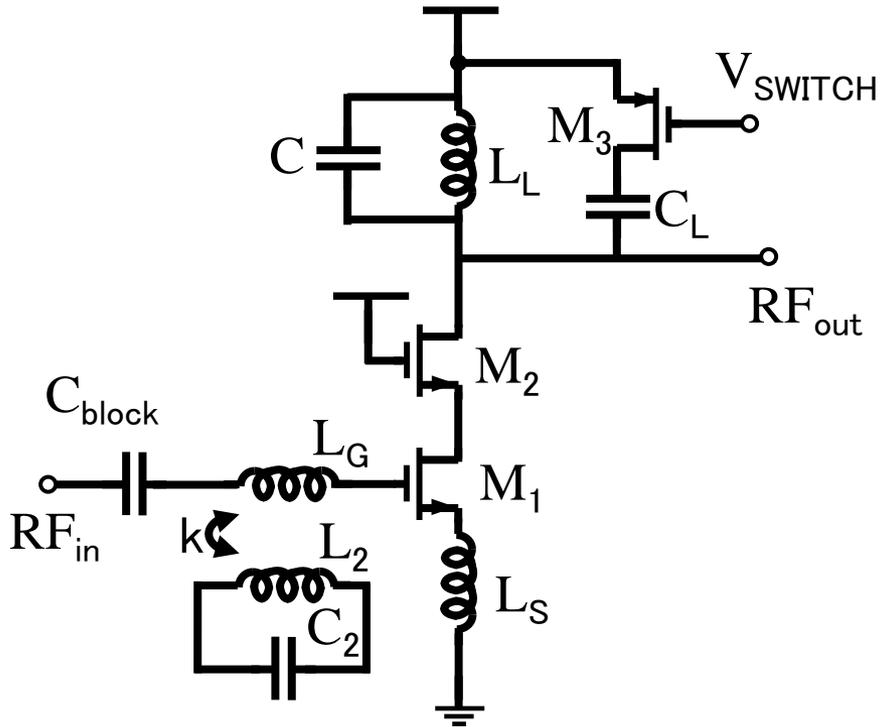
Xiaohua Yu

- 出典

IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS

I :REGULAR PAPERS, Vol.59, NO.8, AUGUST, 2012

論文の回路



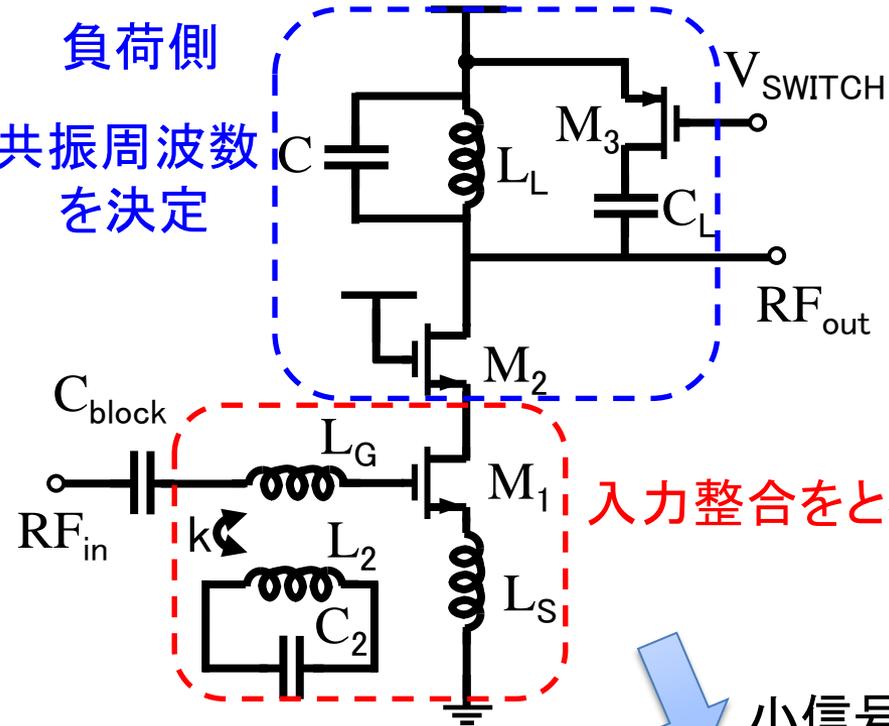
トランスを用いたDual-Band LNA

- L_G と L_2 をトランス結合した回路
- 入力整合側と負荷側の両方で2つの共振周波数をとれる

論文の回路

負荷側

共振周波数を決定

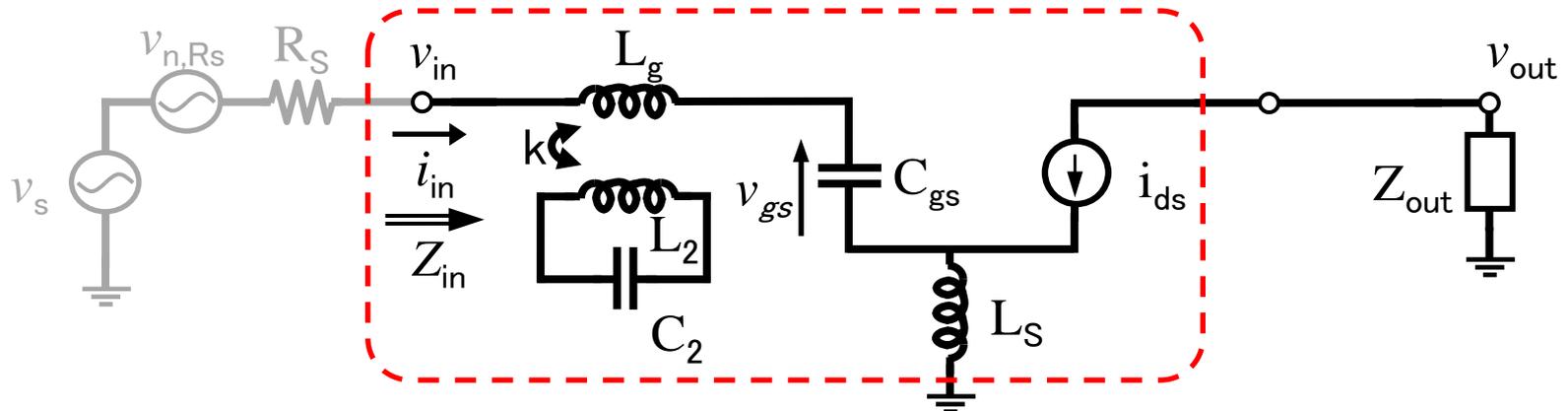


入力整合をとる

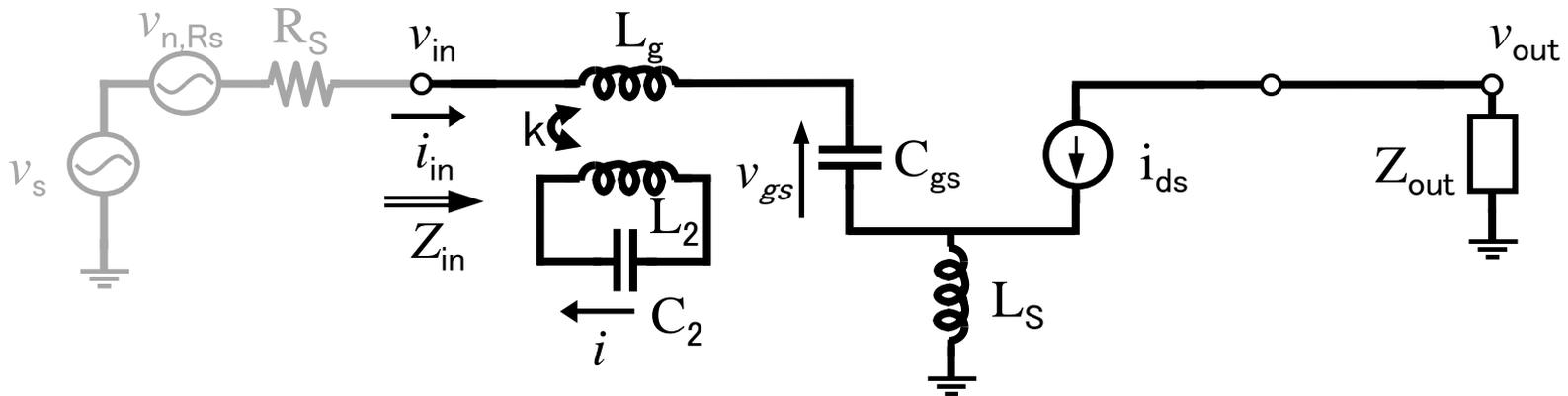
トランスを用いたDual-Band LNA

- L_G と L_2 をトランス結合した回路
- 入力整合側と負荷側の両方で2つの共振周波数をとれる

小信号等価回路



論文の回路解析



入力インピーダンス Z_{in} は

$$Z_{in} = \frac{g_m L_s}{C_{gs}} + j \left\{ \omega(L_g + L_s) - \frac{1}{\omega C_{gs}} + \frac{\omega^3 M^2 C_2}{1 - \omega^2 L_2 C_2} \right\}$$

実数 $\Rightarrow R_s (50\Omega)$

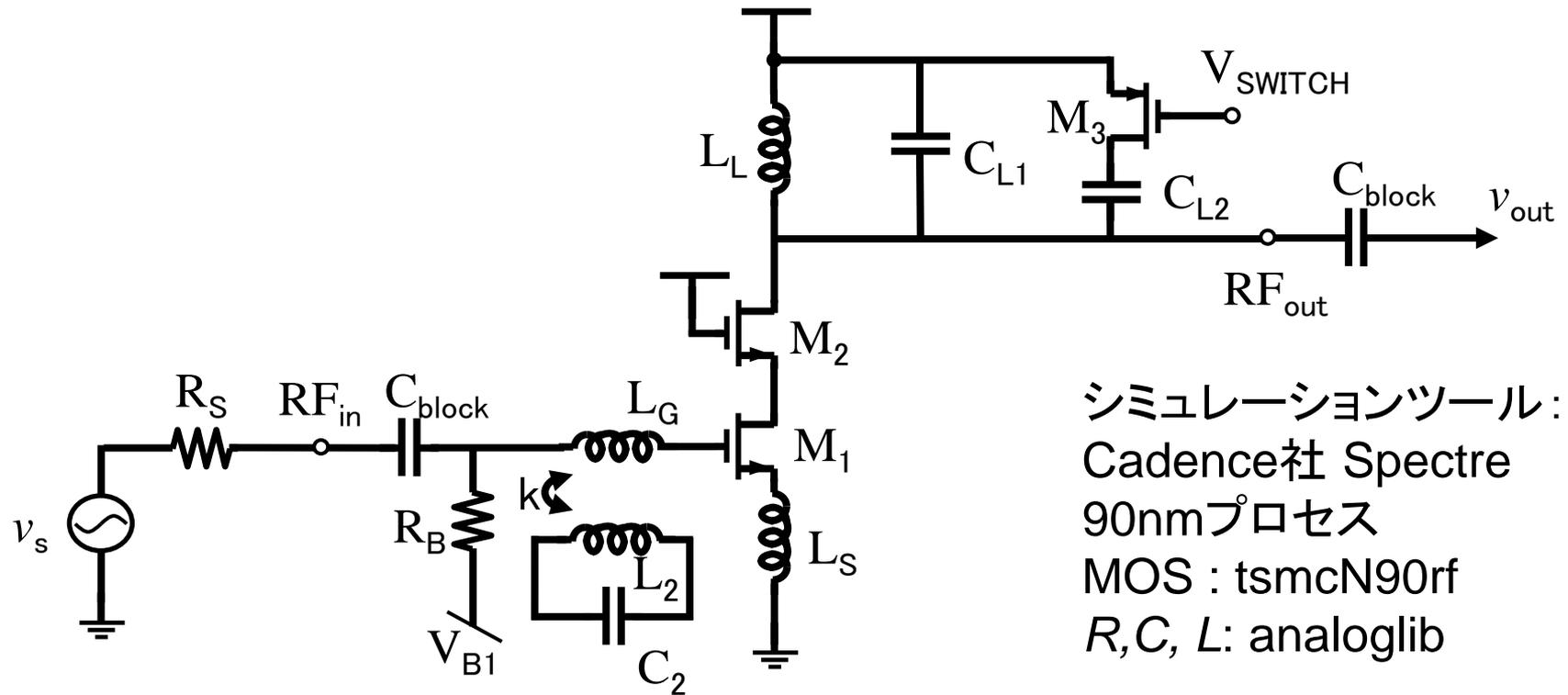
虚数 $\Rightarrow 0$ 0となる ω が共振周波数

$Im(Z_{in}) = 0$ を解くと

$$\omega = \pm \sqrt{\frac{a^2 + b^2 \mp \sqrt{a^4 + b^4 + a^2 b^2 (4k^2 - 2)}}{2(1 - k^2)}} \quad a = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_{gs}}}, \quad b = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

解は四つ(正・負の解が二つずつ)
 \Rightarrow 周波数軸上で共振周波数は二つある

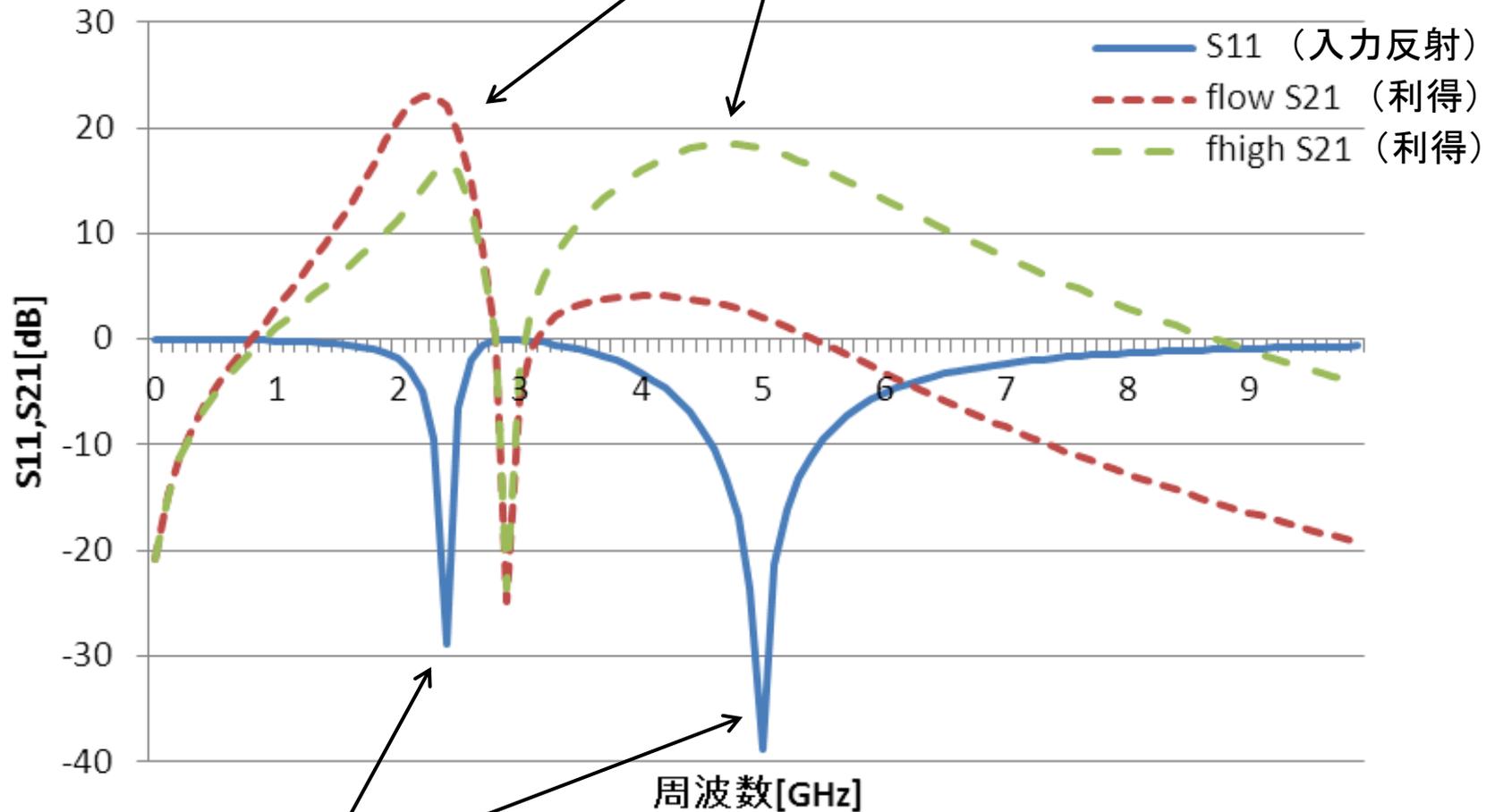
シミュレーション回路



$R_B = 100\text{k}\Omega$	$L_G = 8.2\text{nH}$	M_1	M_2	$L_L = 1\text{nH}$
$V_B = 0.6\text{V}$	$L_2 = 4\text{nH}$	$W=160\mu\text{m}$	$W=30\mu\text{m}$	$C_{L1} = 1\text{pF}$
$C_{block} = 1\text{nF}$	$L_S = 180\text{pH}$	$L=100\text{nm}$	$L=100\text{nm}$	$C_{L2} = 4\text{pF}$
$k = 0.6$	$C_2 = 700\text{fF}$	$C_{gs} = 129.4\text{fF}$		

シミュレーション結果 SP解析

整合がとれている周波数でそれぞれ利得がとれている

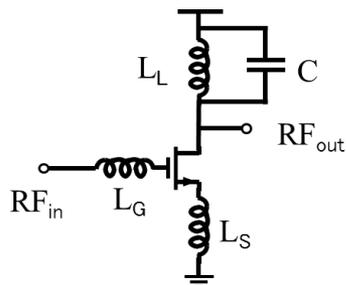
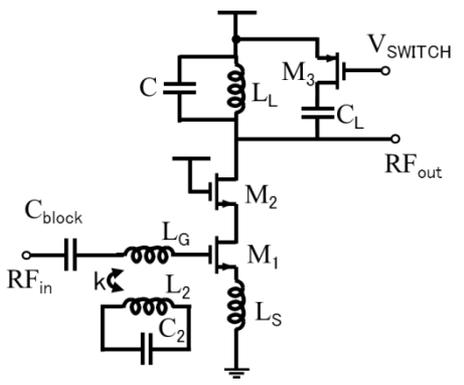


二つの周波数で整合がとれている (Dual-Band)

アウトライン

- Dual Band LNA
 - 研究内容
 - 回路構成と原理
 - シミュレーション
- Triple-Band LNA
 - 回路構成と原理
 - シミュレーション
- 考察
 - インダクタ・トランスのレイアウト考察

Triple-Band化を考える

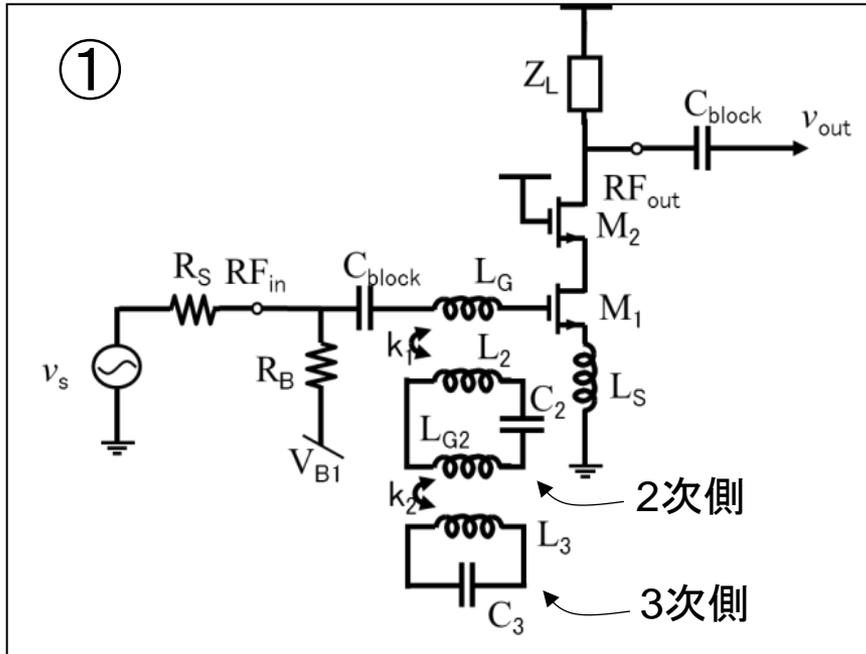
	トランスの数	共振周波数の数
	0	1 (Single-Band)
	1	2 (Dual-Band)
<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 100px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 0 auto;">?</div>	2	3 ? (Triple-Band ?)

予想

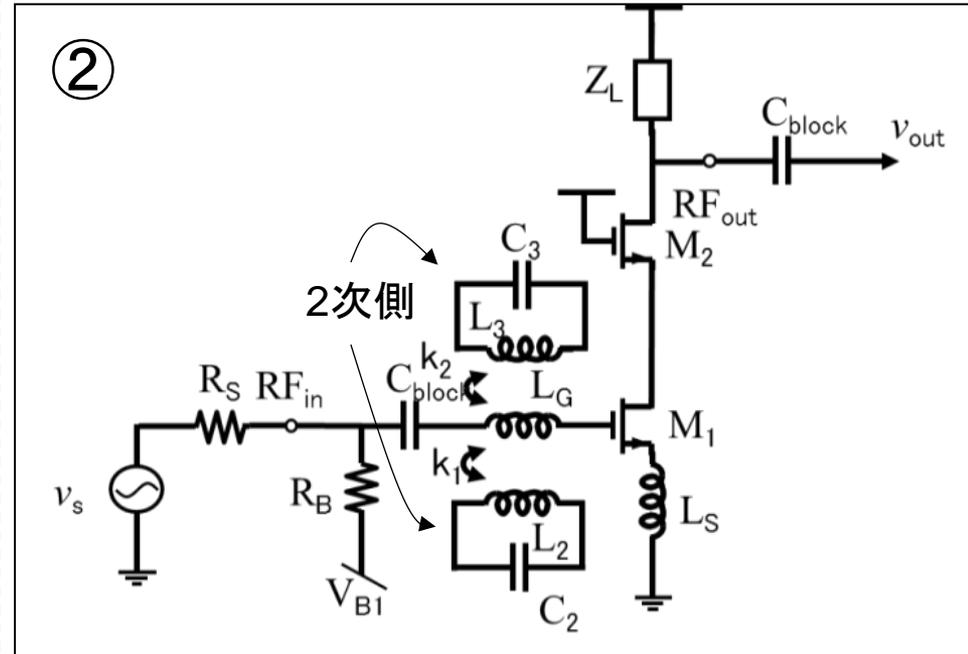
トランス2個用いたLNAは共振周波数3つに対応するTriple-Bandになるのではないかと

Triple-Band LNAの提案

Triple-Bandが実現できた回路構成は①②である



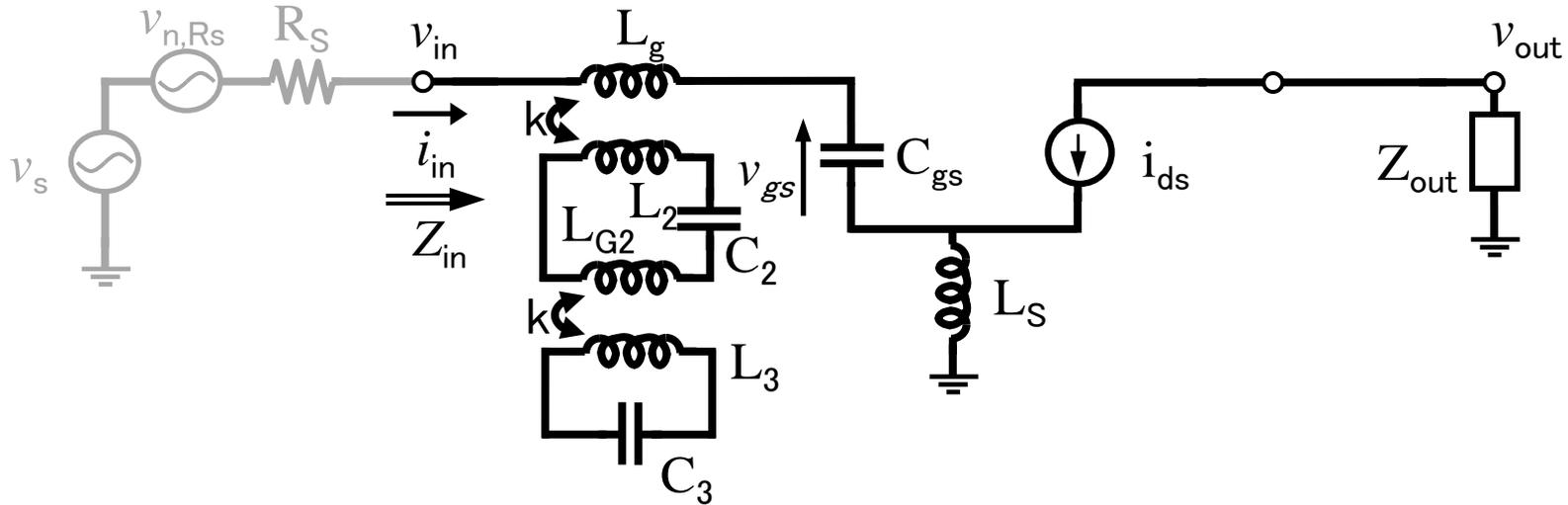
- L_G と L_2 をトランス結合
- L_{G2} と L_3 をトランス結合
- 2次側を経て3次側に結合させる構成方式



- L_G と L_2 をトランス結合
- L_G と L_3 をトランス結合
- 1次側と2次側でのトランス結合を二つ使う構成方式

Triple-Band LNA①の解析

トランス結合を拡張した小信号等価回路

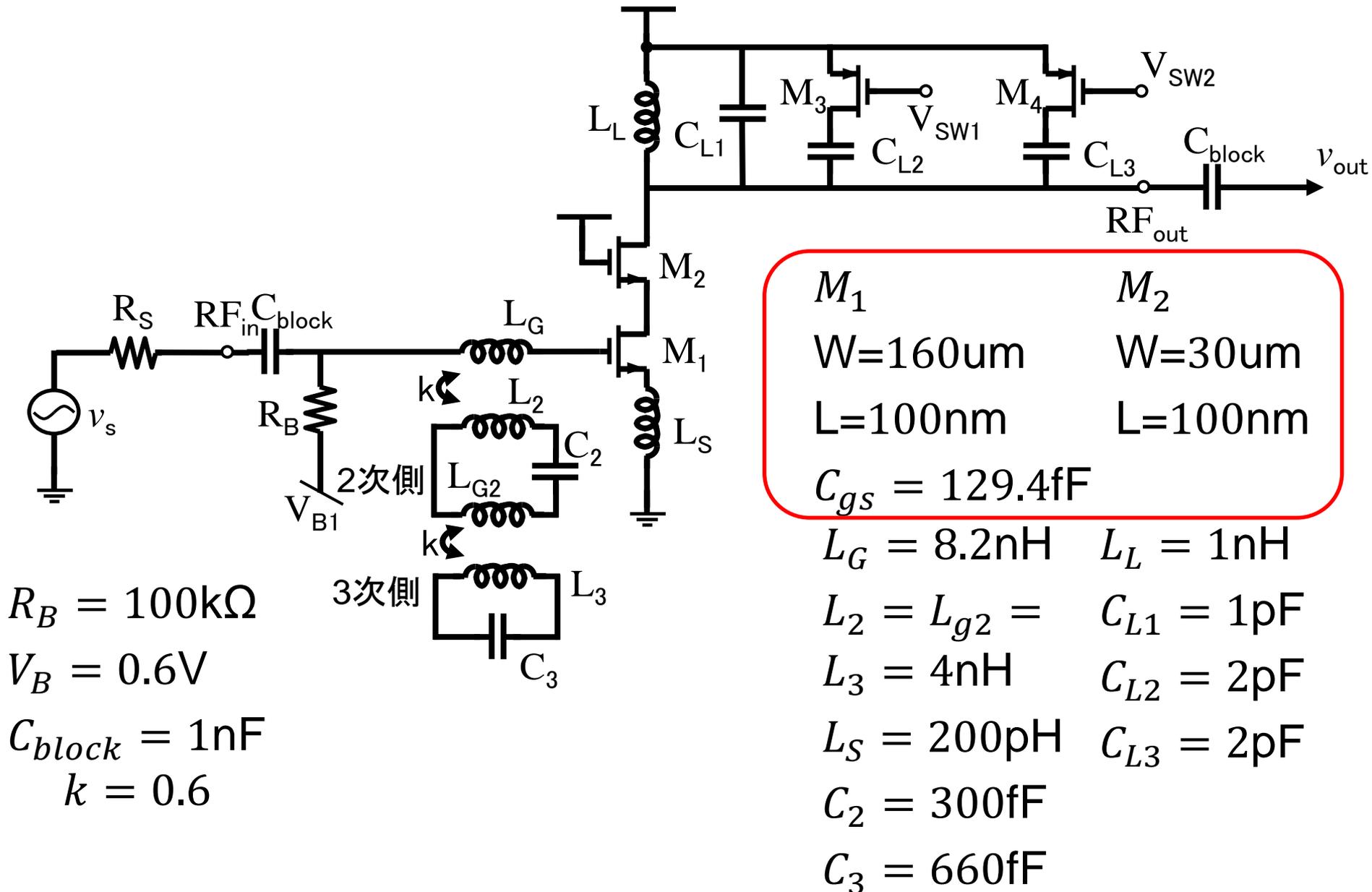


$Im(Z_{in}) = 0$ より共振周波数を求める式を計算すると

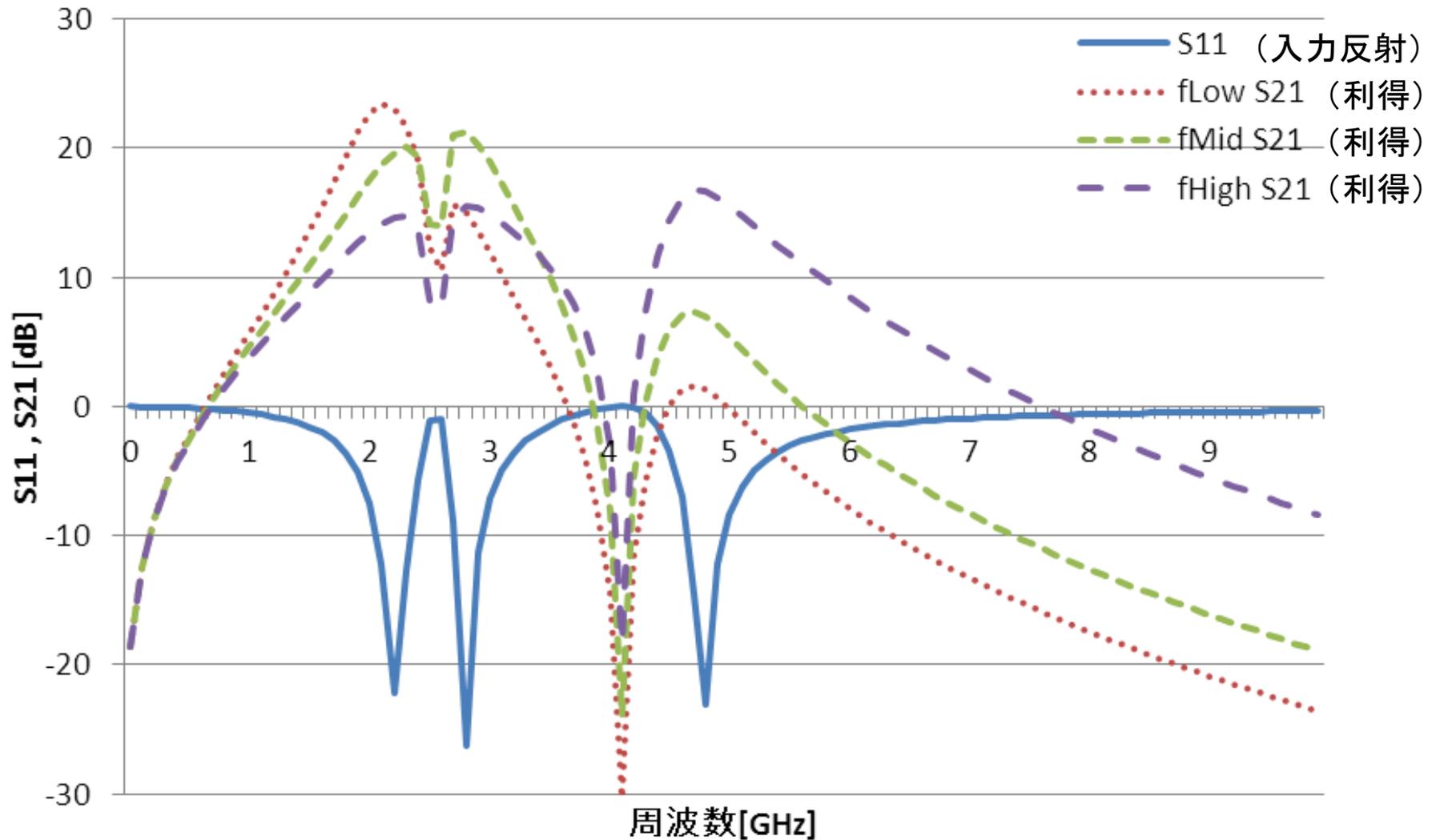
$$\begin{aligned} & \omega^6 C_{gs} C_2 C_3 \{ (L_g + L_s)(L_2 + L_{g2})L_3 - (L_g + L_s)k_2^2 L_{g2}L_3 - k_1^2 L_g L_2 L_3 \} \\ & + \omega^4 \{ -(L_g + L_s)C_{gs}(L_2 + L_{g2})C_2 - (L_g + L_s)C_{gs}L_3C_3 - (L_2 + L_{g2})C_2L_3C_3 \\ & \qquad \qquad \qquad + k_2^2 L_{g2}C_2L_3C_3 + k_1^2 L_g C_{gs}L_2C_2 \} \\ & + \omega^2 \{ (L_g + L_s)C_{gs} + (L_2 + L_{g2})C_2 + L_3C_3 \} - 1 = 0 \end{aligned}$$

共振周波数を求める式は6次方程式(共振周波数3つ)

シミュレーション回路



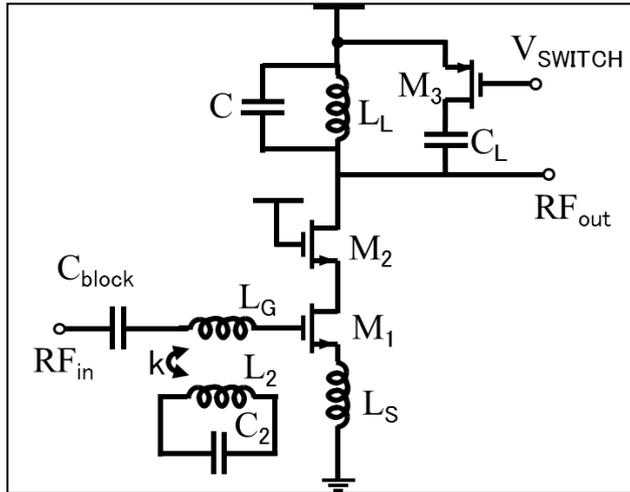
シミュレーション結果 SP解析



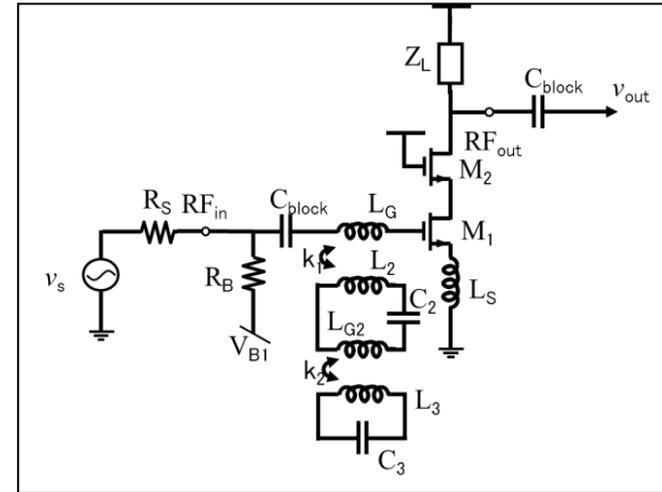
アウトライン

- Dual Band LNA
 - 研究内容
 - 回路構成と原理
 - シミュレーション
- Triple-Band LNA
 - 回路構成と原理
 - シミュレーション
- 考察
 - インダクタ・トランスのレイアウト考察

Triple-Bandに拡張する際の問題



Dual-Band LNA



Triple-Band LNA

Dual-Band LNA

インダクタLの増加

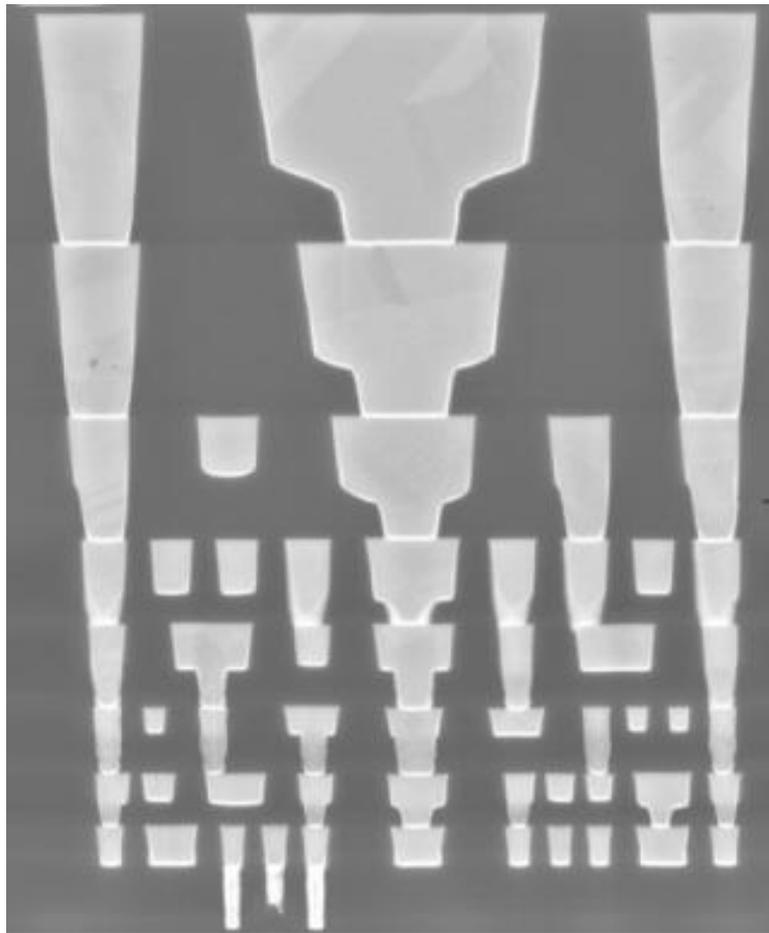
Triple-Band LNA

問題

- ・面積拡大
- ・雑音成分増加
(L自体も雑音を発するため)

この問題を考慮してレイアウトを考える

チップ上でのインダクタ・トランスの実現



最上層の配線は
太い場合が多い

チップ上でのインダクタの実現には
Q値の高い最上層のレイヤーを
使用する

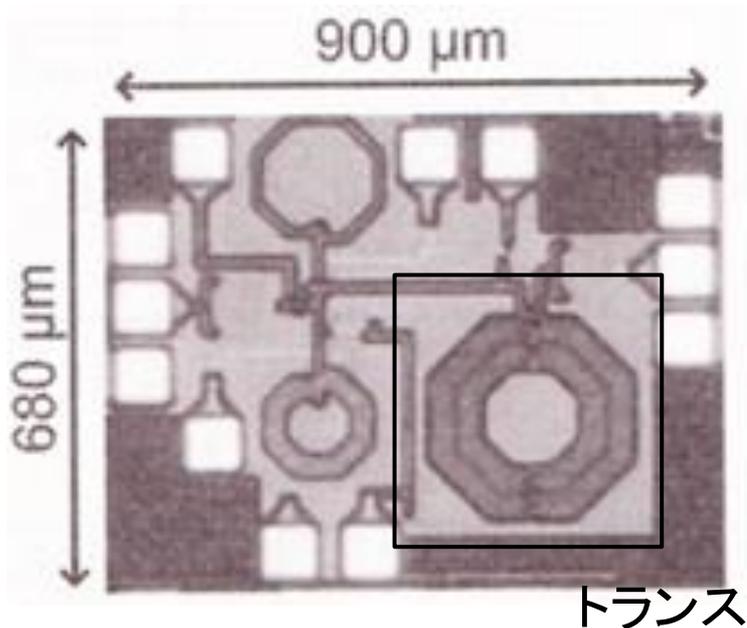
(Q値が高いほどインダクタの抵抗
成分が低くなる)

LSIの断面図

レイアウト考察

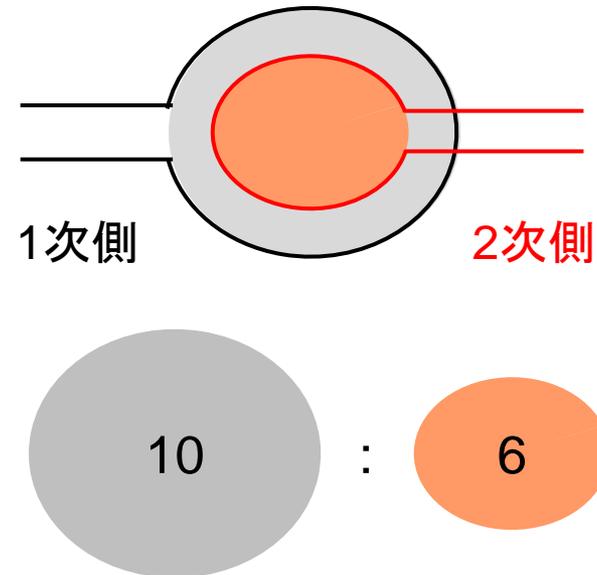
- 3次のトランス・インダクタの実現・概略図

〔 今回二つのインダクタが共有する面積で結合係数が決まるものとする 〕



Dual-Band LNAの実装

上から見た概略図

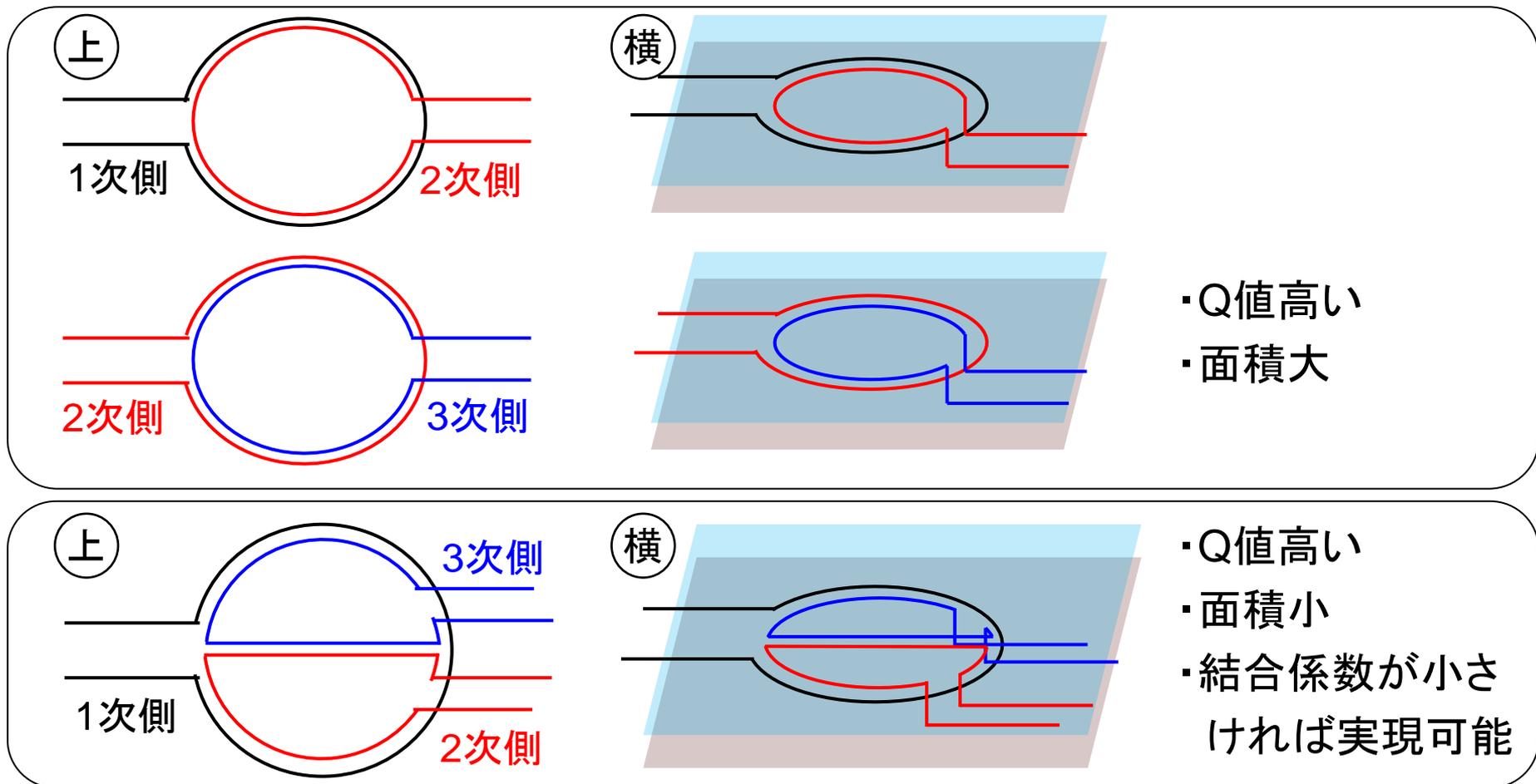


1次側の面積に対し2次側の面積が占める割合が6割なら結合係数は $k=0.6$

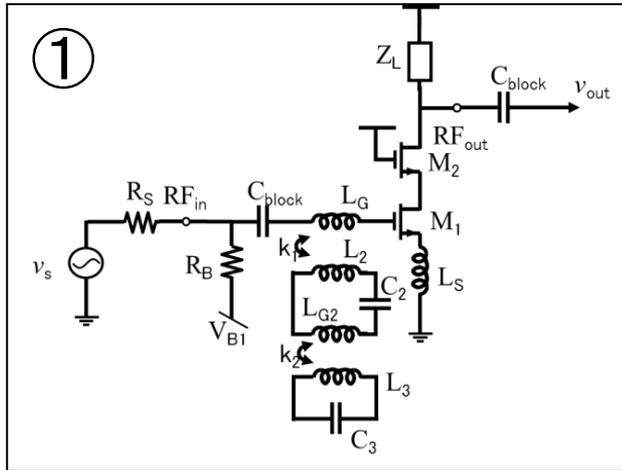
レイアウト考察

- 3次のトランス・インダクタの実現・概略図

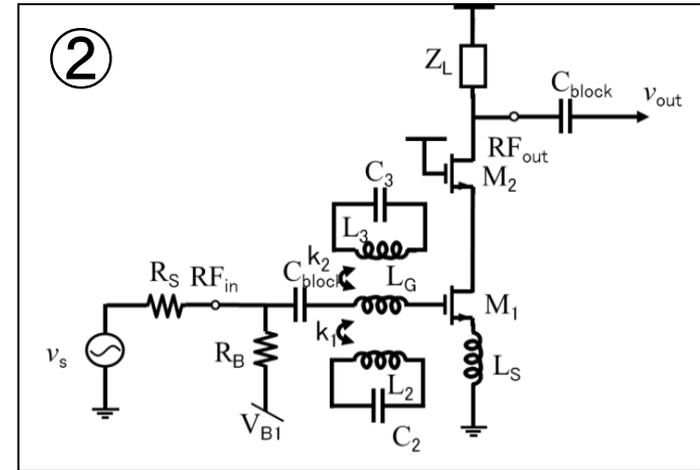
〔 今回二つのインダクタが共有する面積で結合係数が決まるものとする 〕



Triple-Band LNA



提案回路①

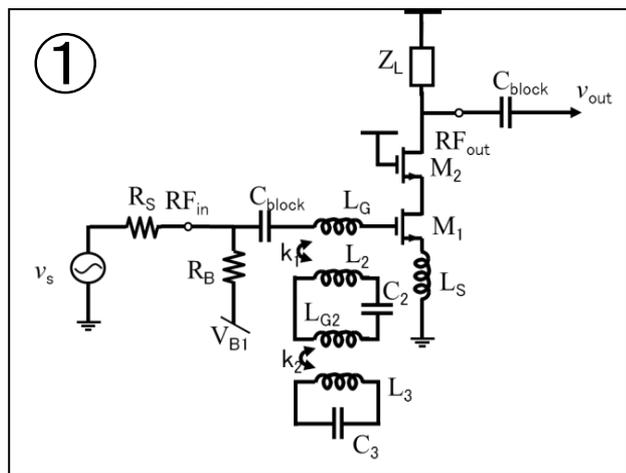


提案回路②

今回Triple-Band LNAでは提案回路①または②を用いて

- 共振周波数 f_{High} は5~6GHzまで出すことを考える
- 面積についてもより小さくすることを考える

①と②の比較

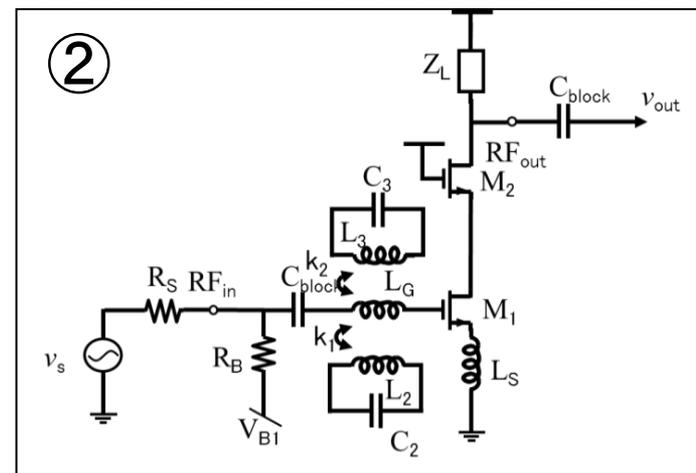
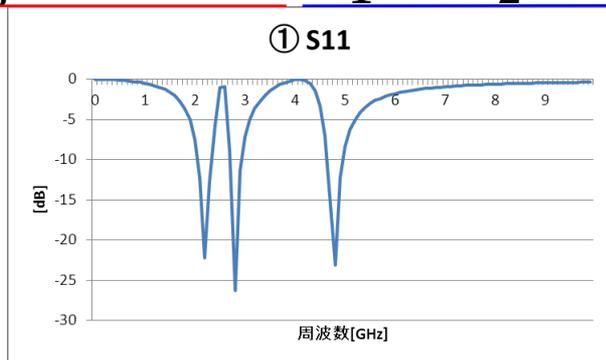


$$\underline{L_G = 8.2\text{nH}} \quad C_2 = 300\text{fF}$$

$$\underline{L_2 = 4\text{nH}} \quad C_3 = 660\text{fF}$$

$$\underline{L_{G2} = 4\text{nH}}$$

$$\underline{L_3 = 4\text{nH}} \quad \underline{k_1 = k_2 = 0.6}$$

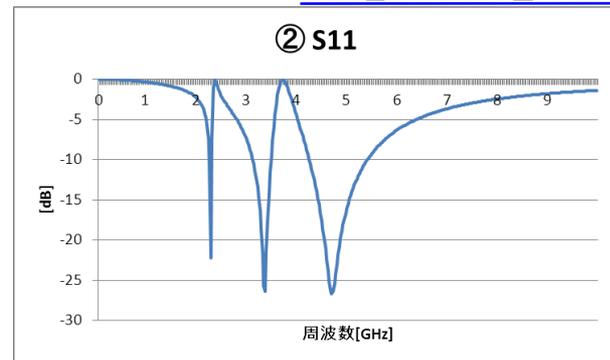


$$\underline{L_G = 4\text{nH}} \quad C_2 = 600\text{fF}$$

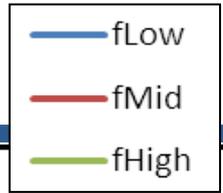
$$\underline{L_2 = 3\text{nH}} \quad C_3 = 880\text{fF}$$

$$\underline{L_3 = 5\text{nH}}$$

$$\underline{k_1 = k_2 = 0.4}$$

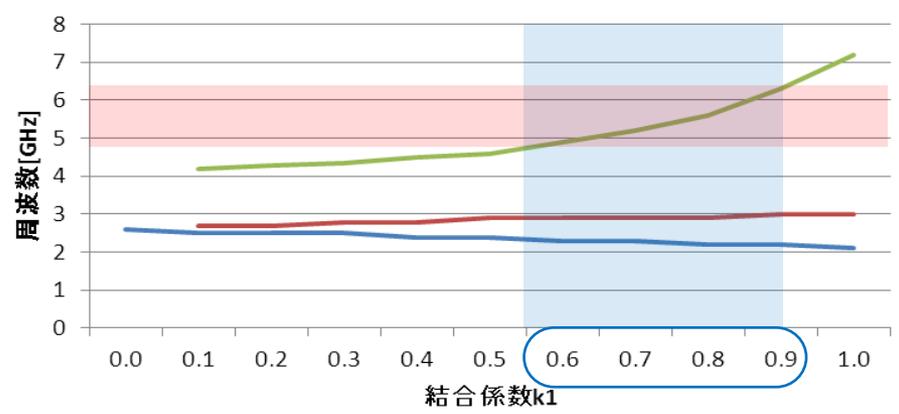


①と②の比較 結合係数k変動



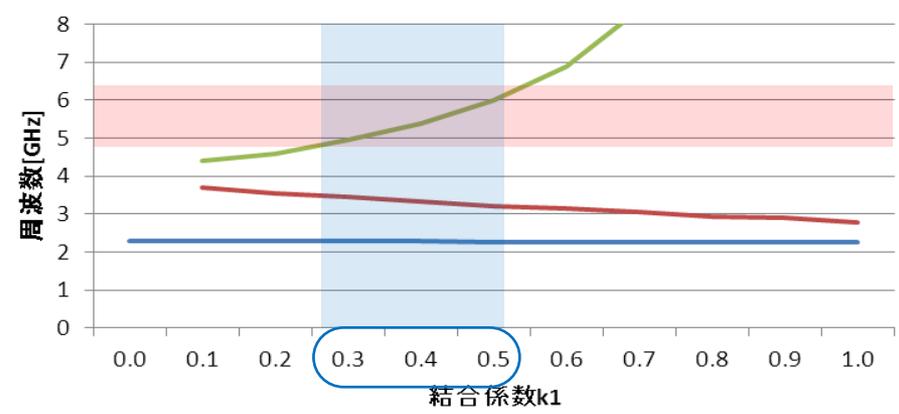
①

k1変動 k2=0.6

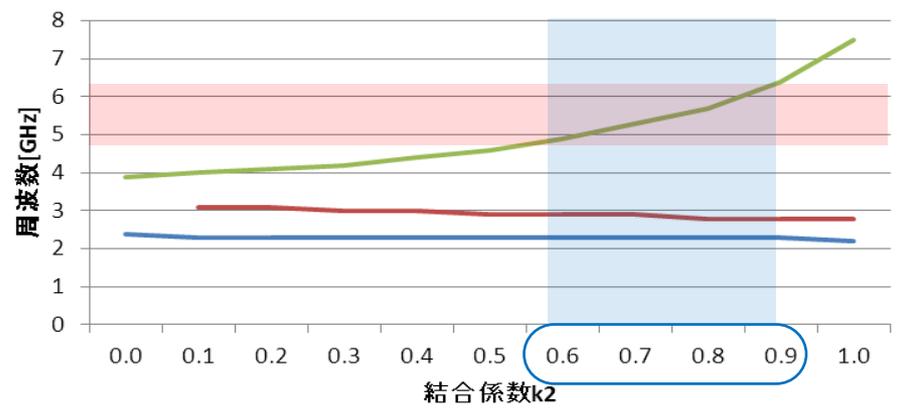


②

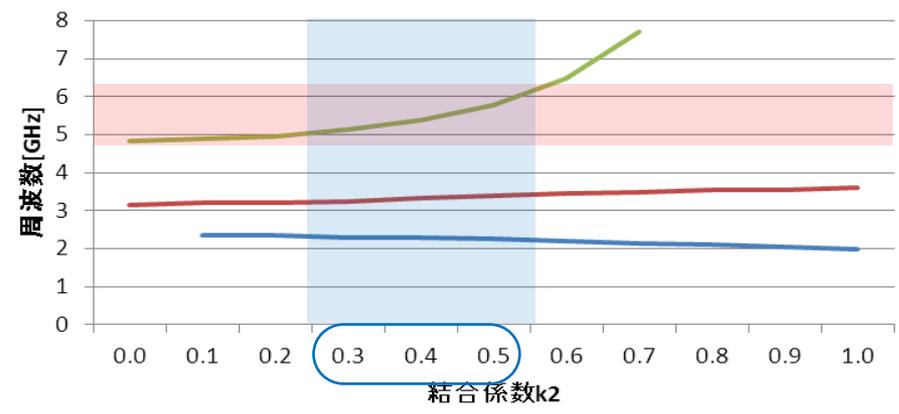
k1変動 k2=0.4



k1=0.6 k2変動

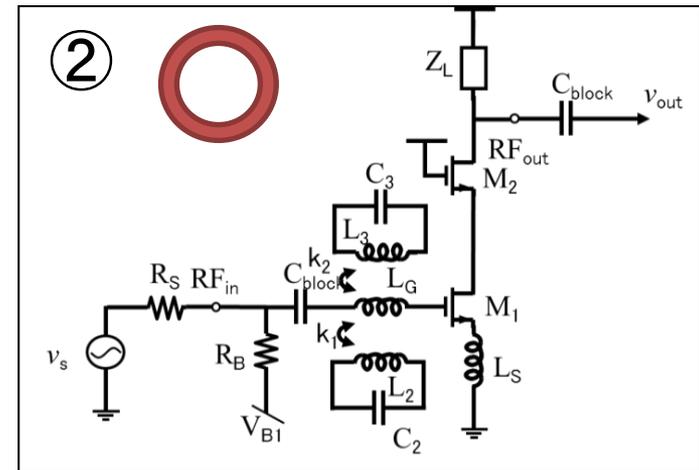
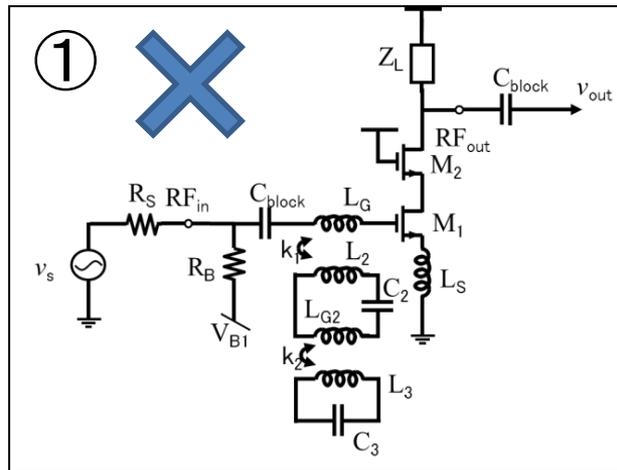


k1=0.4 k2変動



Triple-Band LNA

回路

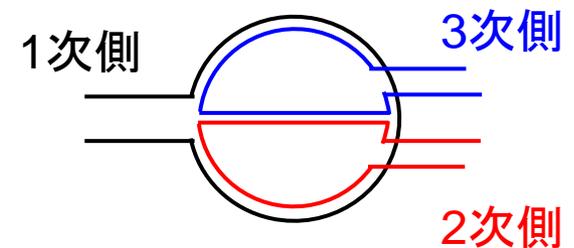
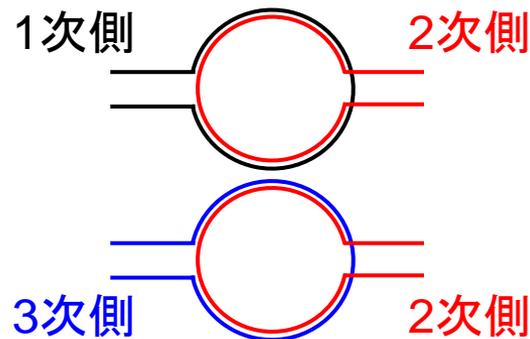


結合係数

・kが高い
 $k_1, k_2 = 0.6$

・kが低い
 $k_1, k_2 = 0.4$

トランス
 レイアウト
 (概略図)



面積

・面積大 

・面積小 

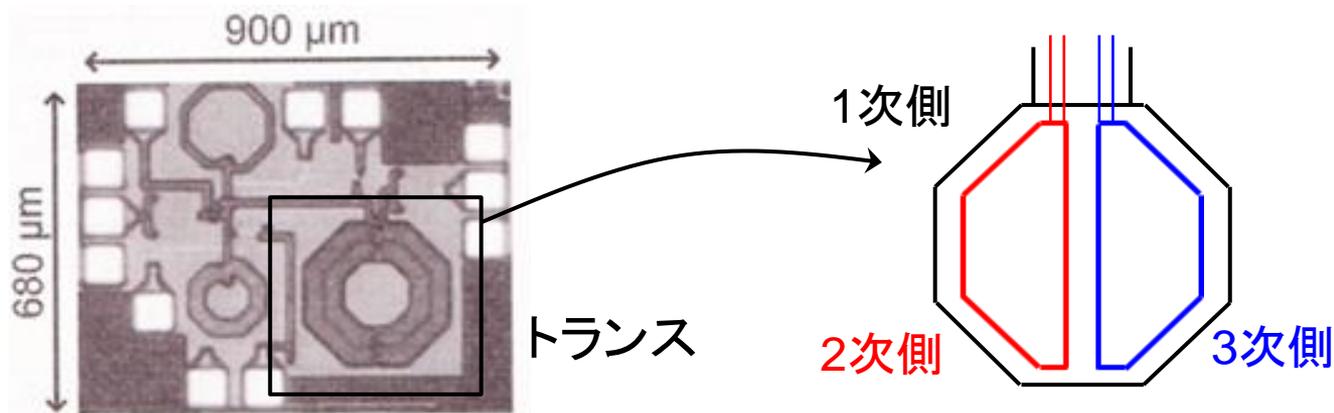
まとめ

まとめ

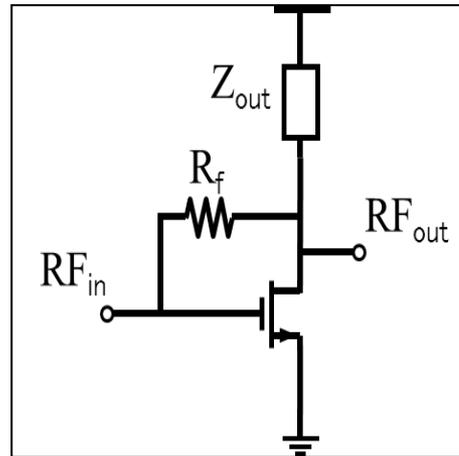
- Triple-Band LNAを実現する回路を提案し解析した
- 提案回路①②を比較し②の構成をとれば面積を小さくより高周波に対応できることを示した

今後の課題

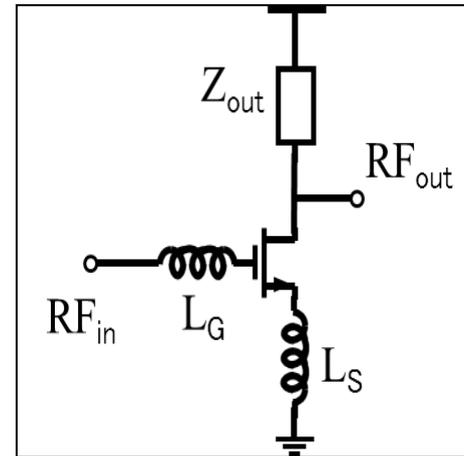
- トランスの電磁界解析を行い実際に実現できるか調べる



補足資料



抵抗帰還型LNA



インダクティブソースデ
イジェネレーションをも

今回注目した構成方法

周波数帯域

広帯域 😊

狭帯域
(共振周波数のみ) 😞

利得

小 😞

大 😊

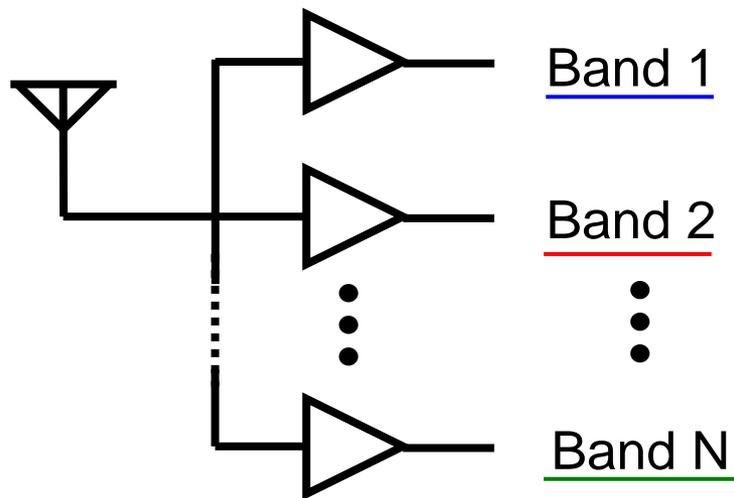
雑音

悪 😞

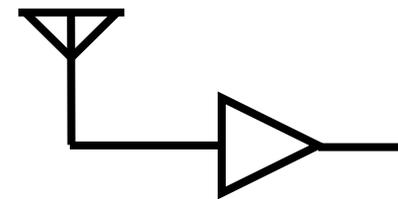
良 😊

補足資料 複数の帯域をもつLNA

狭帯域を複数もたせるためには

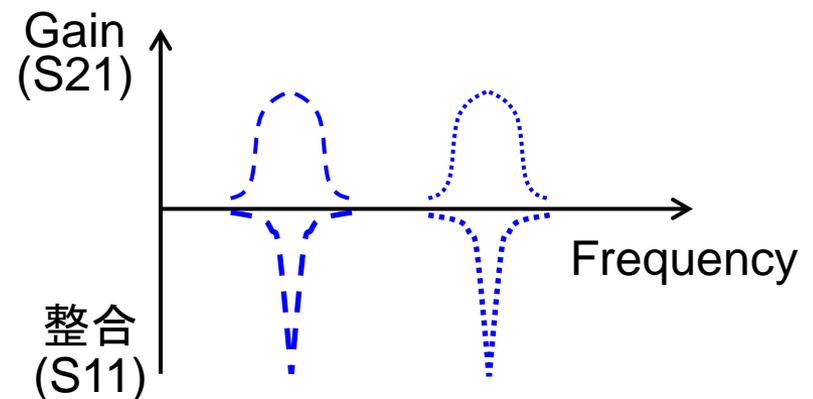
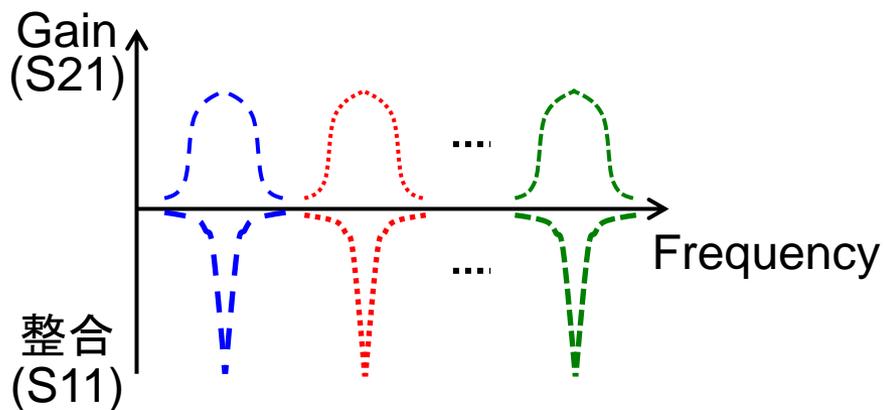


提案

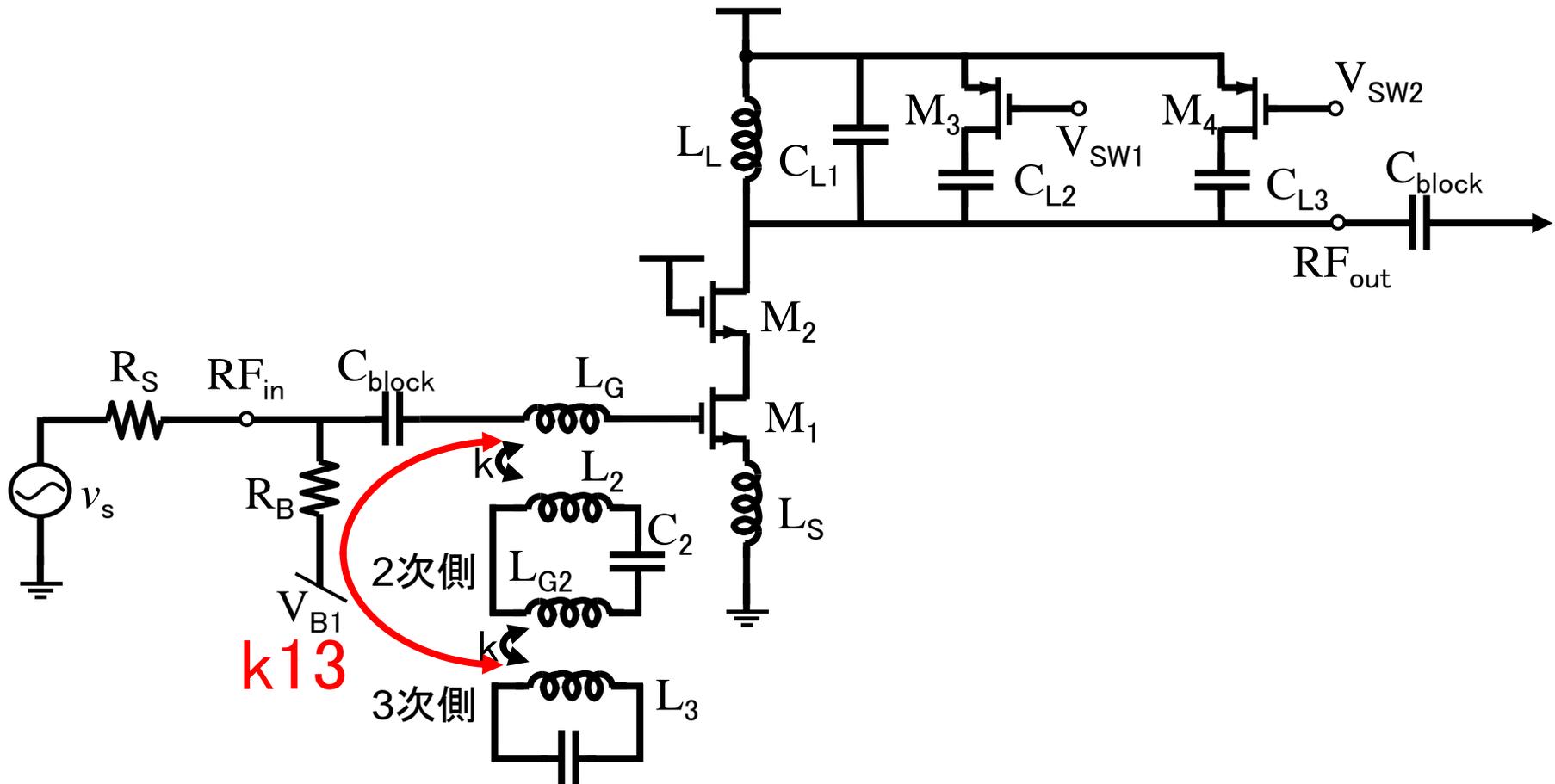


1つで複数の狭帯域をもつLNA

面積の縮小化を図れる

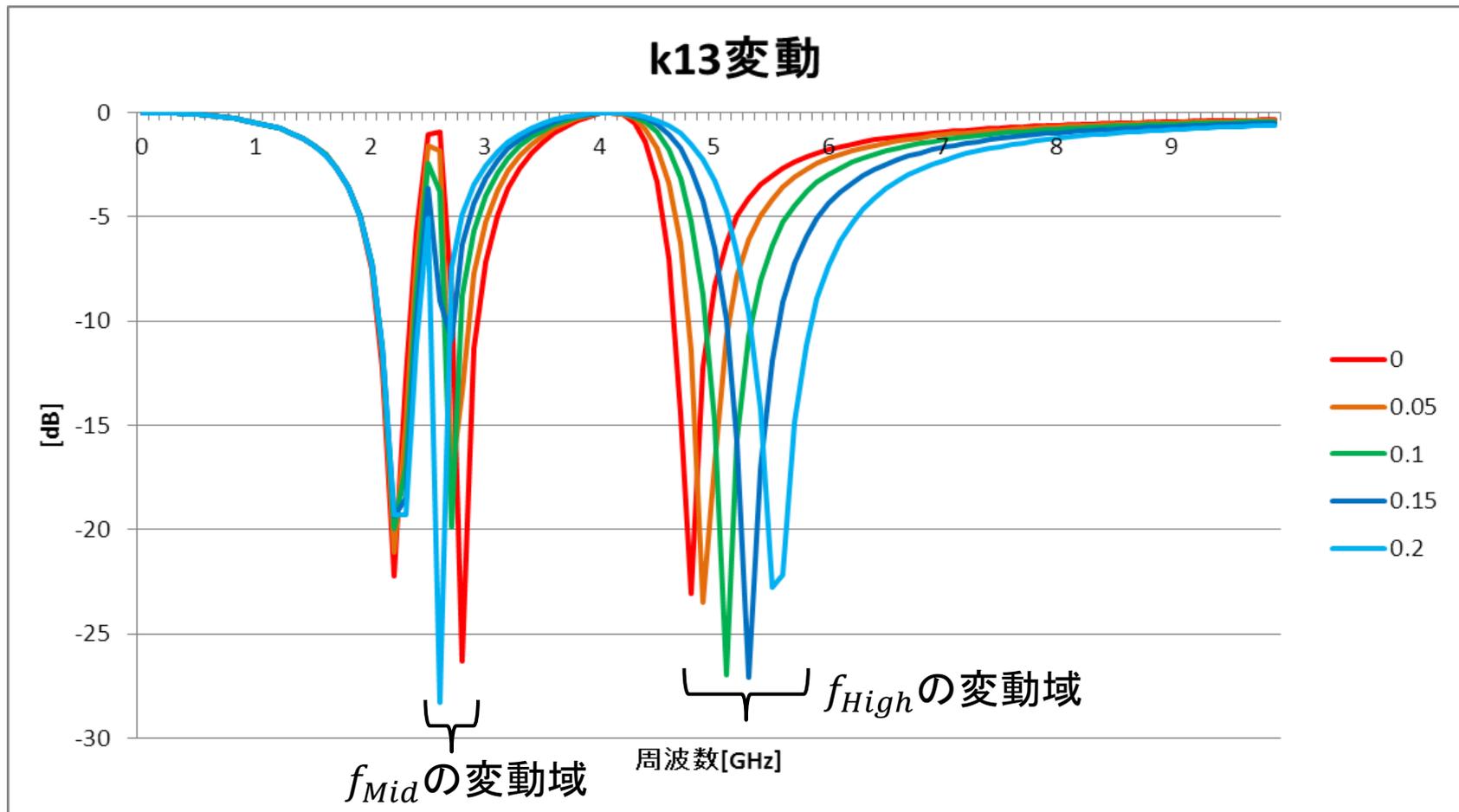


1次と3次のトランスの影響



意図せず生じた結合であることを考慮して
 K_{13} の変動値は
 $K_{13}=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ と小さい値にする

1次と3次のトランスの影響



1次と3次のトランスに結合をもたせても共振周波数のシフトが見られるだけで整合に影響はない

質疑応答

Q.提案したkで実現可能か

A.0.5では難しいと考えている。0.4か0.3程度なら可能かと考えている

Q.他の部分の定数を動かすとどうなる

A.負荷側の素子値は共振周波数を計算しているため変化させたくない

Q.8nHのLはチップ上では難しいのではないか

A.まだ試作などは行っていない

今後の課題にさせていただきます