

剰余系サンプリングによる 高周波/アナログデジタル混載集積回路の 試験技術の検討

片山 翔吾, 阿部 優大, 桑名 杏奈,
浅見 幸司, 石田 雅裕, 大田 龍弥, 小林 春夫

群馬大学

株式会社アドバンテスト研究所

株式会社 アドバンテスト



Outline

1. 研究背景
2. 剰余系サンプリング
 - 中国の剰余定理
 - 剰余系サンプリングの原理
3. 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験への応用
 - 周波数分解能の向上
 - マルチトーン試験への応用
 - 高周波狭帯域デバイス試験への応用
4. まとめ

Outline

1. 研究背景

2. 剰余系サンプリング

- 中国の剰余定理
- 剰余系サンプリングの原理

3. 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験への応用

- 周波数分解能の向上
- マルチトーン試験への応用
- 高周波狭帯域デバイス試験への応用

4. まとめ

研究背景

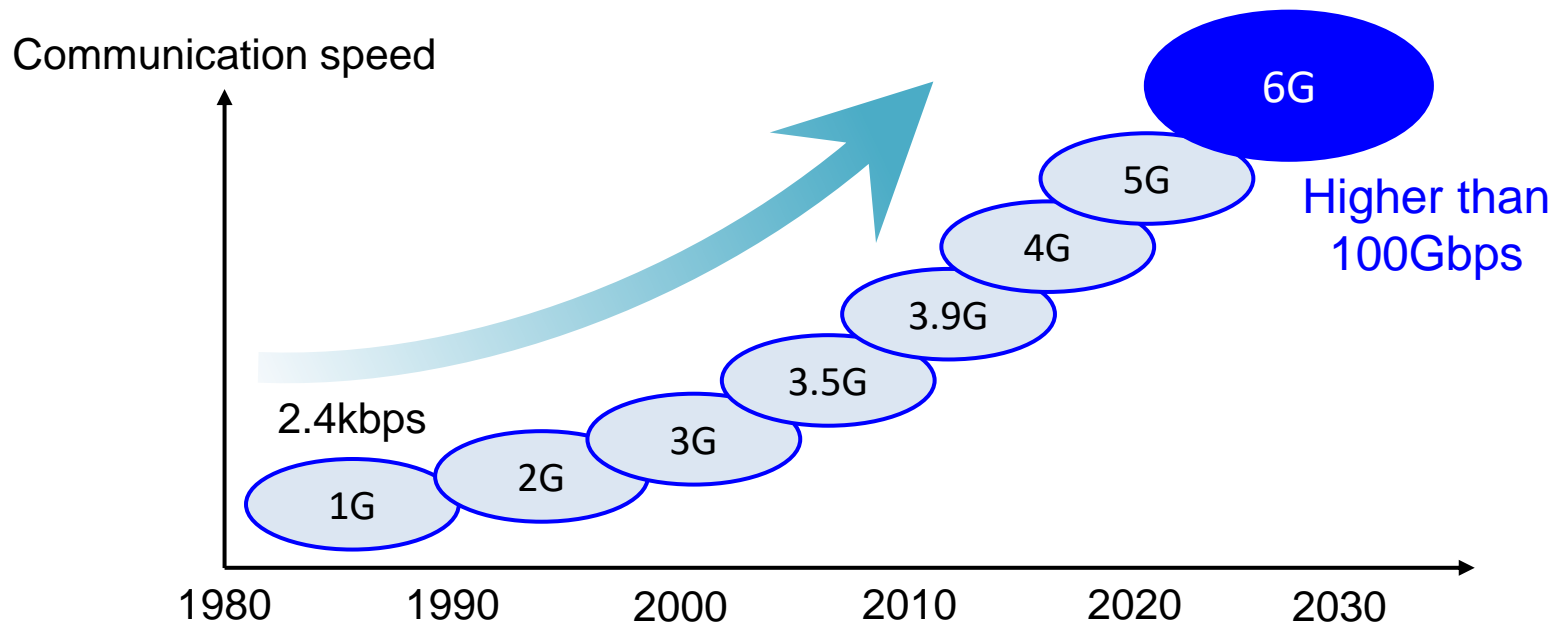
5Gがスタート 次世代通信6Gの製品開発が求められる



通信周波数はより高周波化



効果的な高周波デバイス試験技術が要求される



研究目標

安価な高周波デバイス試験技術を開発



剰余系サンプリングを用いた
高周波/アナログデジタル混載集積回路試験

剰余系サンプリング

高周波信号を複数の低周波クロックでサンプリング
波形の折り返し現象(エイリアシング)を利用

低周波クロック使用 ➡ 高周波サンプリング **低コスト化**

Outline

1. 研究背景
2. 剰余系サンプリング
 - 中国の剰余定理
 - 剰余系サンプリングの原理
3. 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験への応用
 - 周波数分解能の向上
 - マルチトーン試験への応用
 - 高周波狭帯域デバイス試験への応用
4. まとめ

中国の剰余定理



孫子

中国の数学書「孫子算経」に 剰余を用いた問題

3で除した場合の剰余は2
5で除した場合の剰余は3
7で除した場合の剰余は2
元の数はいくつか?

答え: 23

一般化



中国の剰余定理



孫子算経

中国の剰余定理の利用法

兵士の数を早く数え上げるために使用



孫子

3人組の余りは?

余り: 2人



...



中国の剰余定理の利用法

兵士の数を早く数え上げるために使用



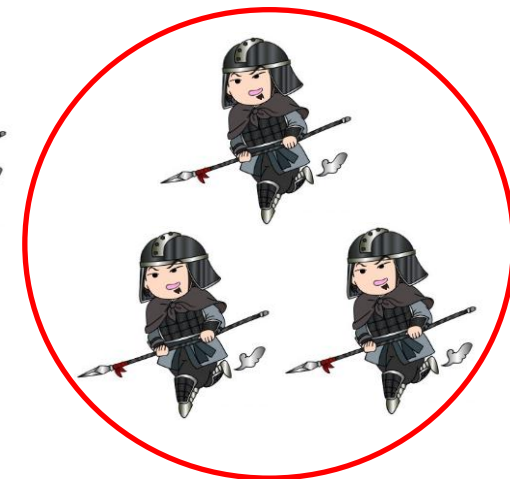
孫子

5人組の余りは?

余り: 3人



...



中国の剰余定理の利用法

兵士の数を早く数え上げるために使用



孫子

7人組の余りは?で23人

余り: 2人



剰余系の例

$$\text{mod}_3 23 = 2, \text{mod}_5 23 = 3, \text{mod}_7 23 = 2$$

- 互いに素な自然数 3, 5, 7
 $N = 3 \times 5 \times 7 = 105$
- k ($0 \leq k \leq N - 1 (= 104)$)

$$a: k \text{ を } 3 \text{ で除した剰余} \quad a = \text{mod}_3(k)$$

$$b: \quad 5 \quad b = \text{mod}_5(k)$$

$$c: \quad 7 \quad c = \text{mod}_7(k)$$

$$k \longleftrightarrow (a, b, c)$$

1対1対応

中国の剰余定理

a	b	c	k
0	0	1	15
1	1	2	16
2	2	3	17
0	3	4	18
1	4	5	19
2	0	6	20
0	1	0	21
1	2	1	22
2	3	2	23
0	4	3	24
1	0	4	25
2	1	5	26
0	2	6	27
1	3	0	28
2	4	1	29

剰余系

Outline

1. 研究背景
2. 剰余系サンプリング
 - 中国の剰余定理
 - 剰余系サンプリングの原理
3. 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験への応用
 - 周波数分解能の向上
 - マルチトーン試験への応用
 - 高周波狭帯域デバイス試験への応用
4. まとめ

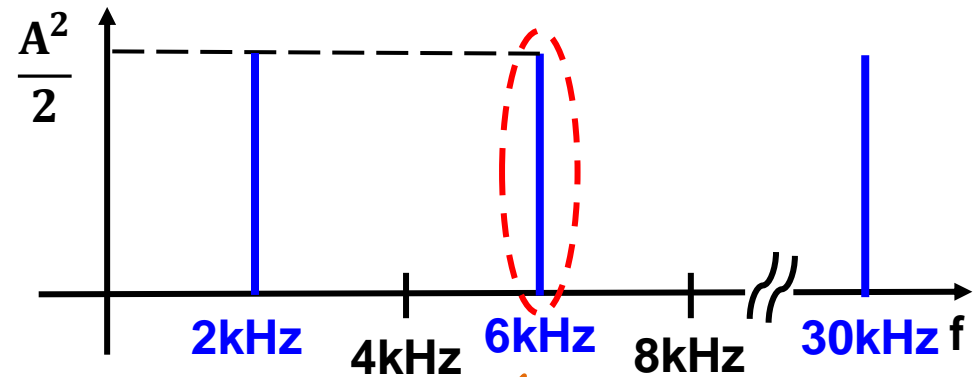
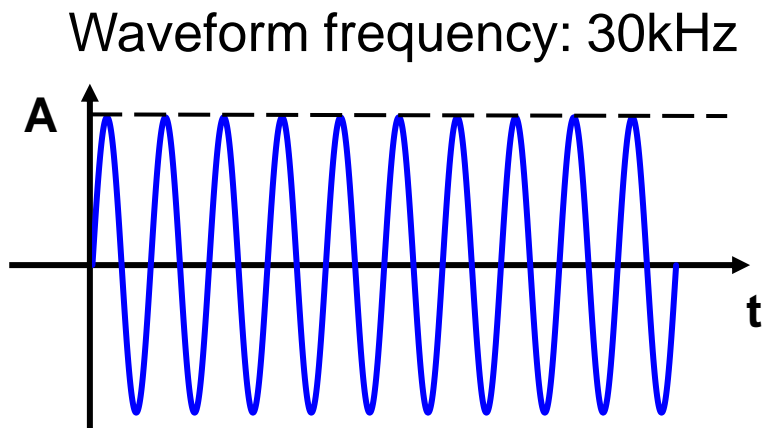
スペクトラムの折り返し現象

入力信号周波数: 30 kHz
サンプリング周波数: 8 kHz

FFT

周波数スペクトラム
サンプリング周波数帯域内に
折り返される

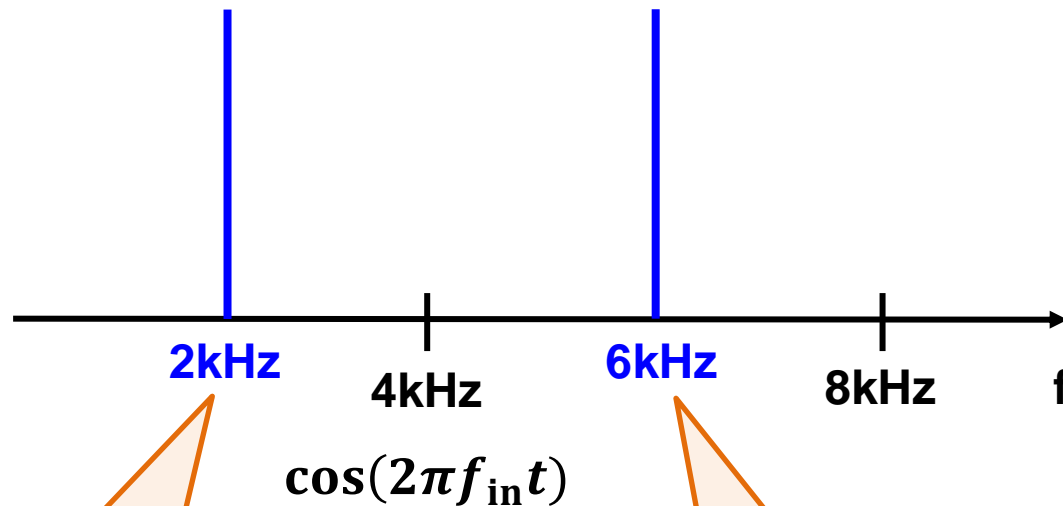
ナイキスト定理を満たさない



剰余周波数
 $\text{mod}_8 30 = 6$

負の周波数スペクトラム

入力信号周波数: 30 kHz
 サンプリング周波数: 8 kHz



負の剰余周波数
 $8 - \text{mod}_8 30 = 2$

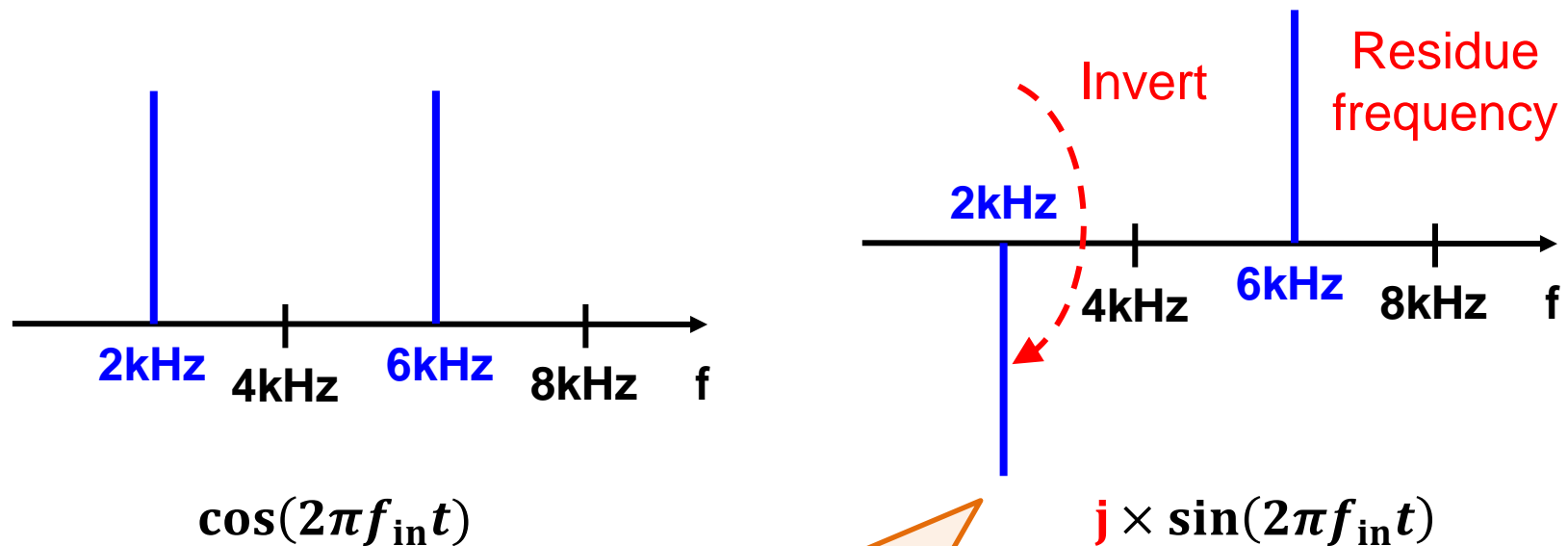
剰余周波数
 $\text{mod}_8 30 = 6$

FFTにより負の周波数スペクトラムも発生
 正の周波数スペクトラムのみ取り出し剰余系を適用

$j \times \sin(2\pi f_{in} t)$ の複素FFT

入力信号周波数: 30 kHz
 サンプリング周波数: 8 kHz

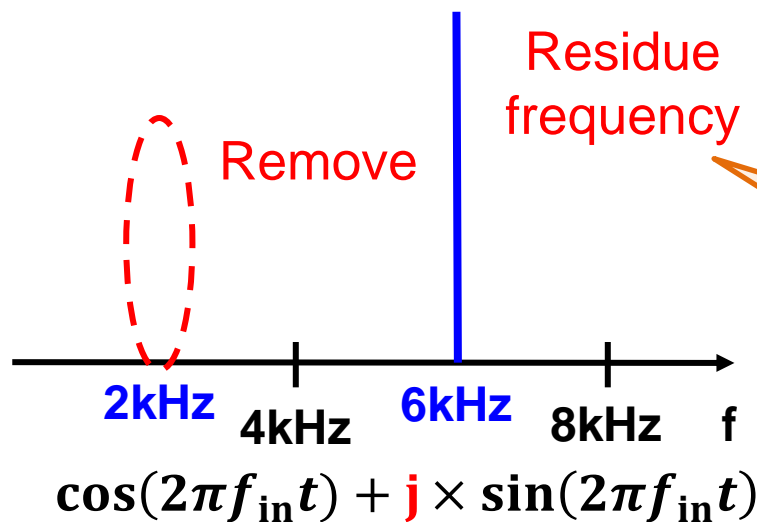
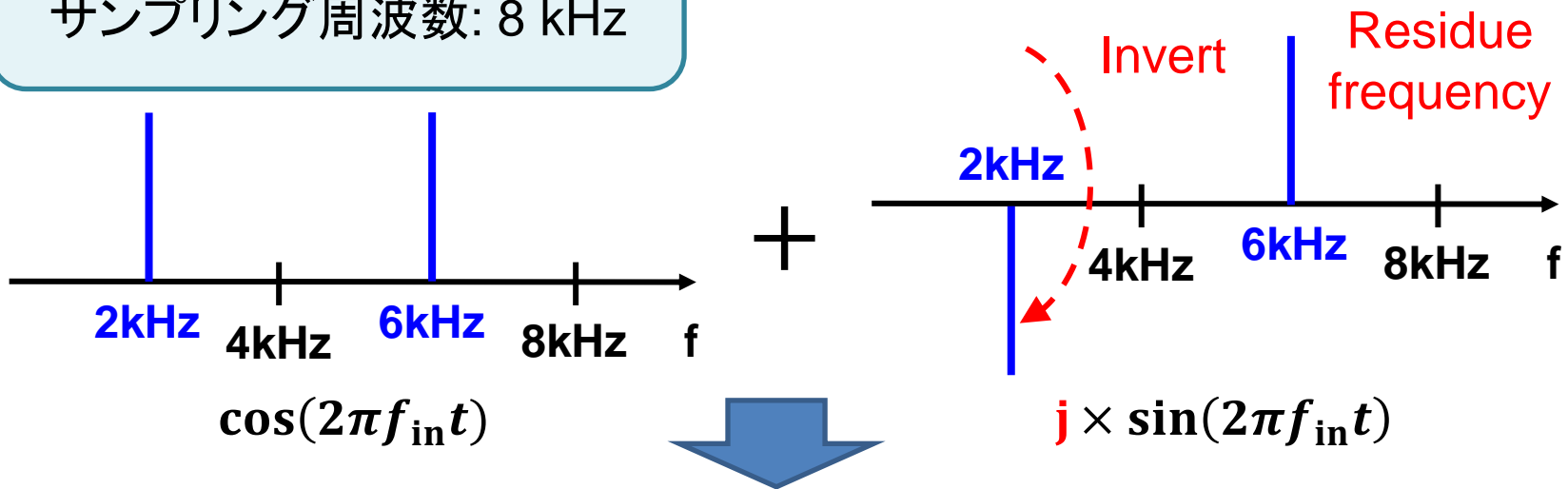
位相を 90° 回転, 複素単位 j をかけて複素FFT



負の周波数スペクトラムが反転

$\cos(2\pi f_{in}t) + j \times \sin(2\pi f_{in}t)$ の複素FFT

入力信号周波数: 30 kHz
サンプリング周波数: 8 kHz



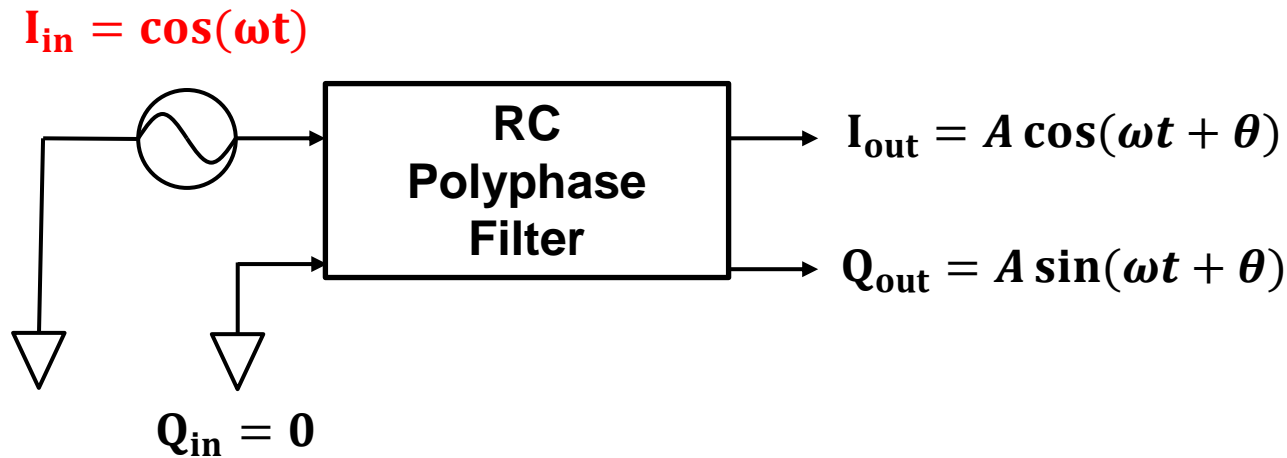
正の剰余周波数スペクトラムのみ
取り出される

$j \times \sin(2\pi f_{in} t)$ の生成方法

アナログ・ヒルベルト・フィルタを使用
(RCポリフェーズフィルタ)



David Hilbert
1862 - 1943

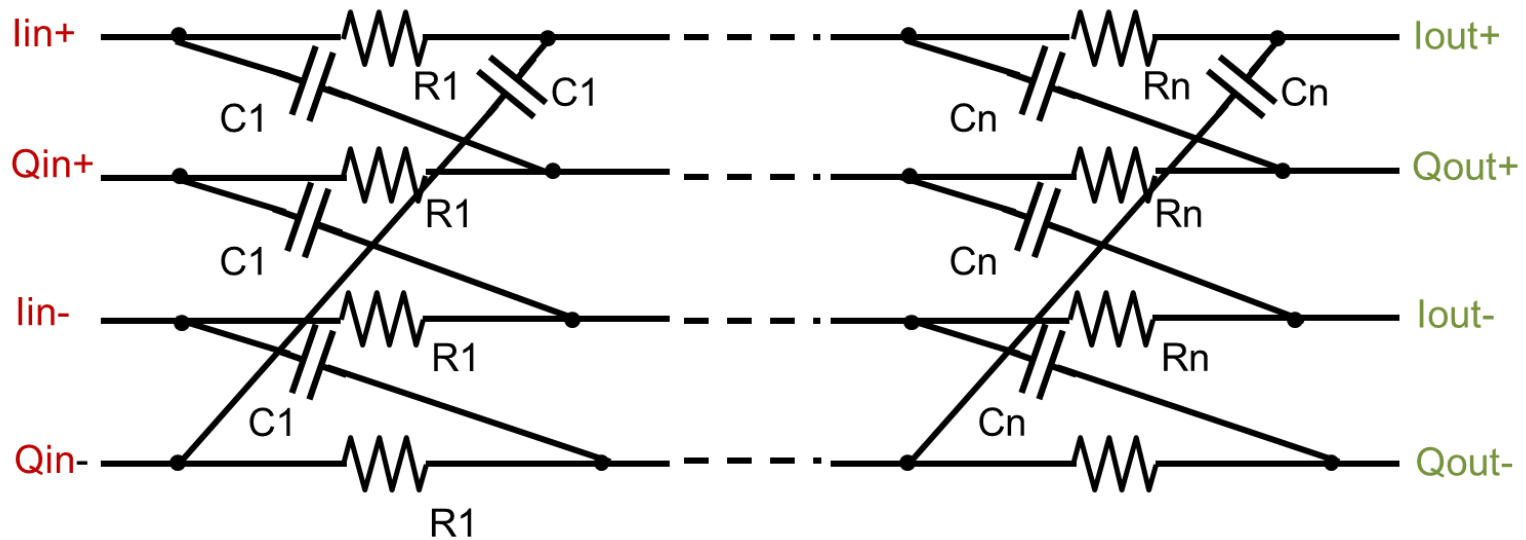
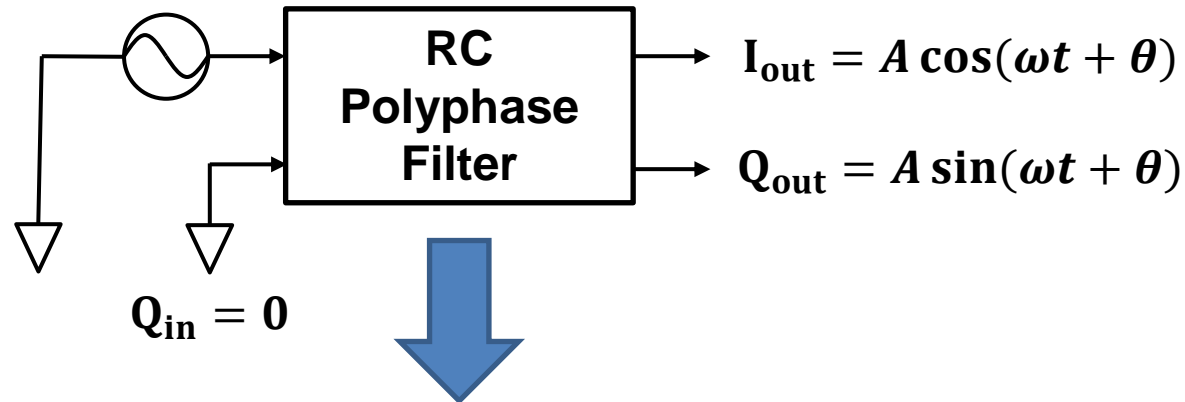


入力信号から同相/直交信号を生成

- [2] Y. Tamura, R. Sekiyama, K. Asami, H. Kobayashi,
"RC Polyphase Filter As Complex Analog Hilbert Filter", IEEE ICSICT (Oct. 2016).

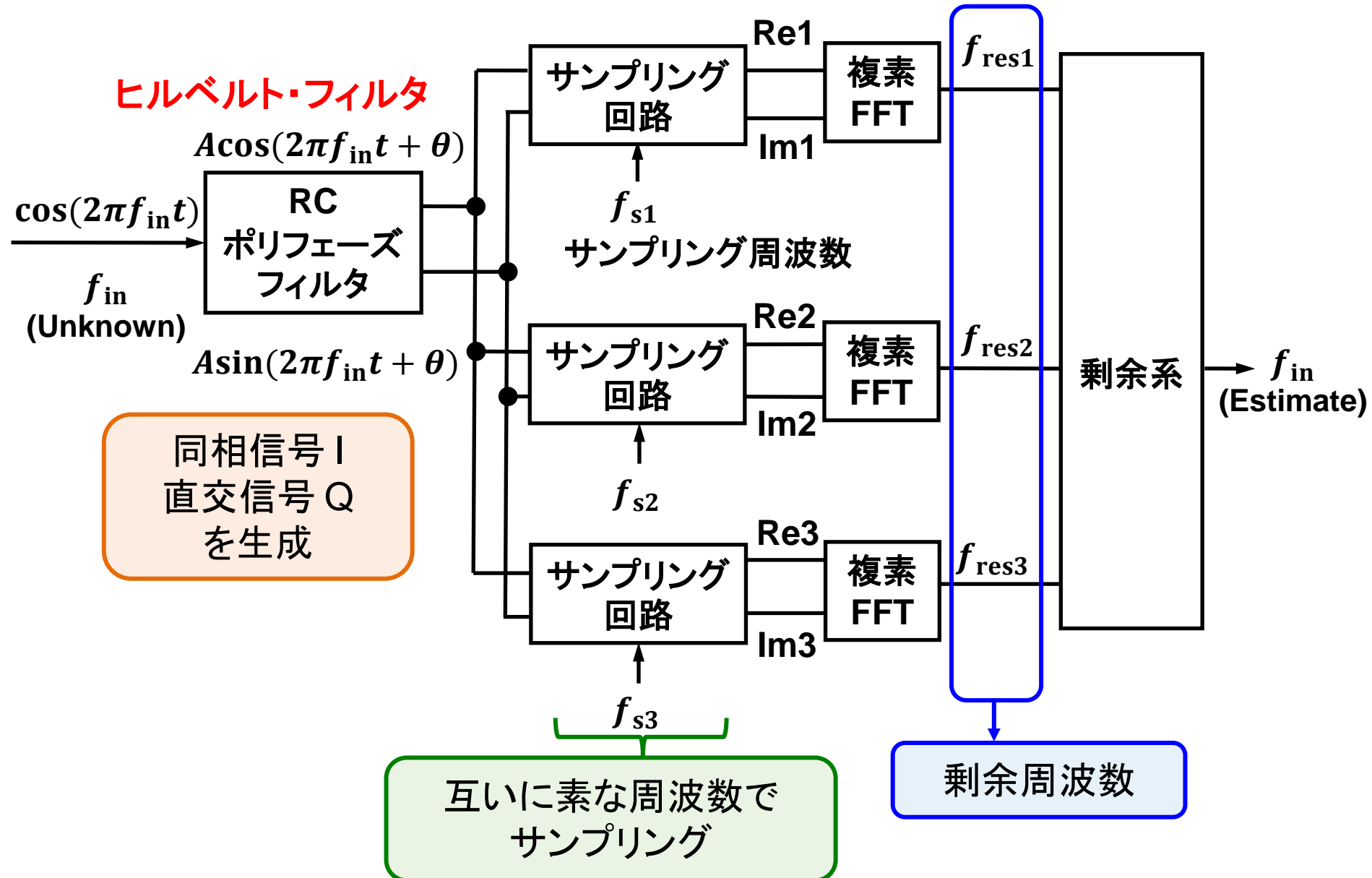
RCポリフェーズフィルタの回路構成

$$I_{in} = \cos(\omega t)$$



パッシブ・バンドストップ・フィルタを構成

剰余系サンプリング回路



剰余系サンプリングによる周波数推定

入力信号周波数: 12 GHz
 サンプリング周波数:
 229 kHz, 233 kHz, 239 kHz

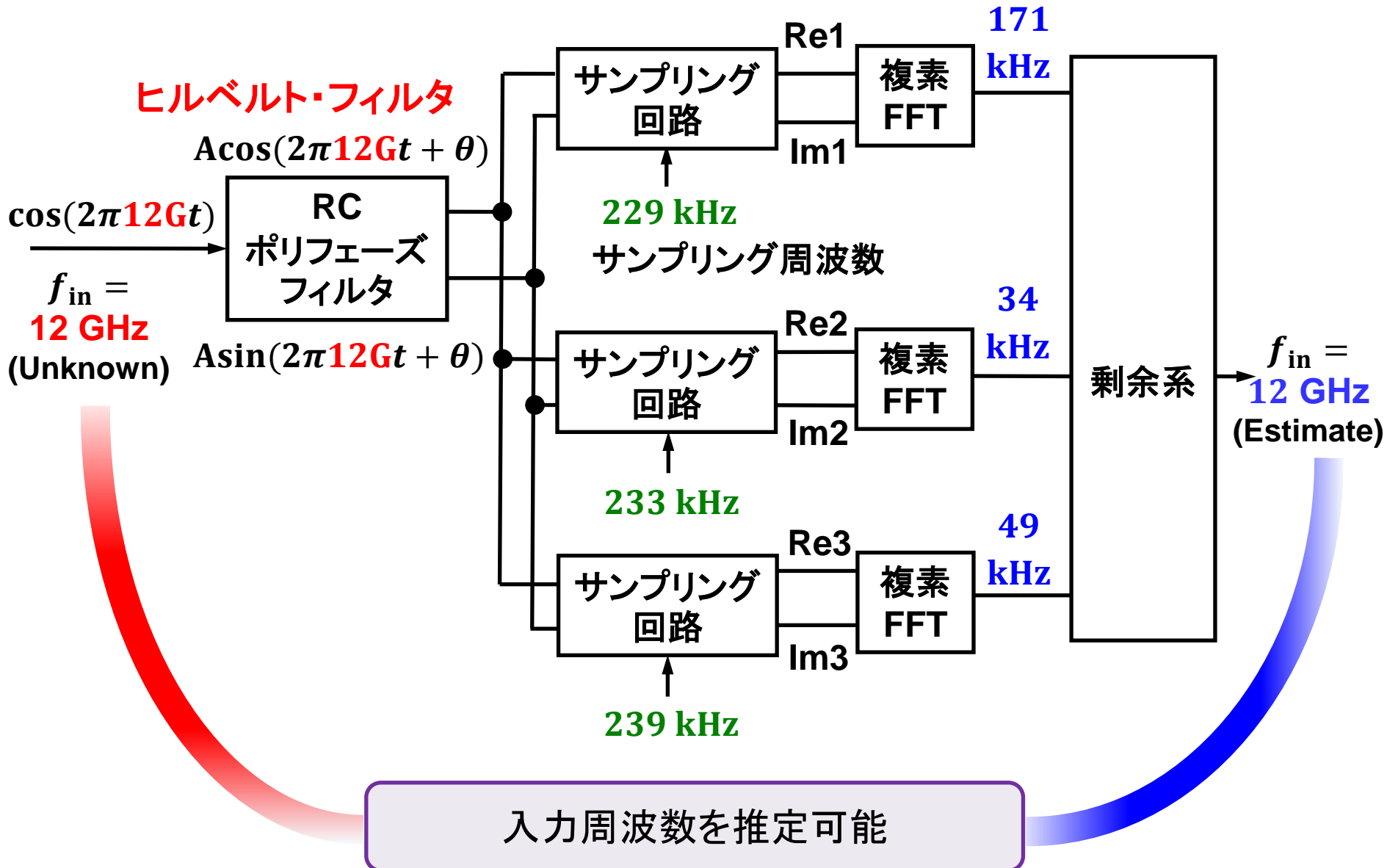
剰余周波数:
 171 kHz, 34 kHz, 49 kHz

剰余周波数と剰余系を用い
 入力周波数を推定

入力周波数推定値: 12 GHz

a [kHz]	b [kHz]	c [kHz]	k [kHz]
0	0	0	0
1	1	1	1
2	2	2	2
⋮	⋮	⋮	⋮
169	32	47	11999998
170	33	48	11999999
171	34	49	12000000
172	35	50	12000001
173	36	51	12000002
⋮	⋮	⋮	⋮
226	230	235	12752320
227	231	237	12752321
228	232	238	12752322

周波数推定シミュレーション



Outline

1. 研究背景
2. 剰余系サンプリング
 - 中国の剰余定理
 - 剰余系サンプリングの原理
3. 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験への応用
 - 周波数分解能の向上
 - マルチトーン試験への応用
 - 高周波狭帯域デバイス試験への応用
4. まとめ

剰余系サンプリングの周波数分解能

$$\text{周波数分解能: } \frac{f_s}{N} = \frac{1}{t_{\max}}$$

N : サンプリングポイント数

t_{\max} : 測定時間

N : 大 \Rightarrow 周波数分解能 $\frac{f_s}{N}$: 高

多数のサンプリングデータの取得により
周波数分解能の高分解能化が可能

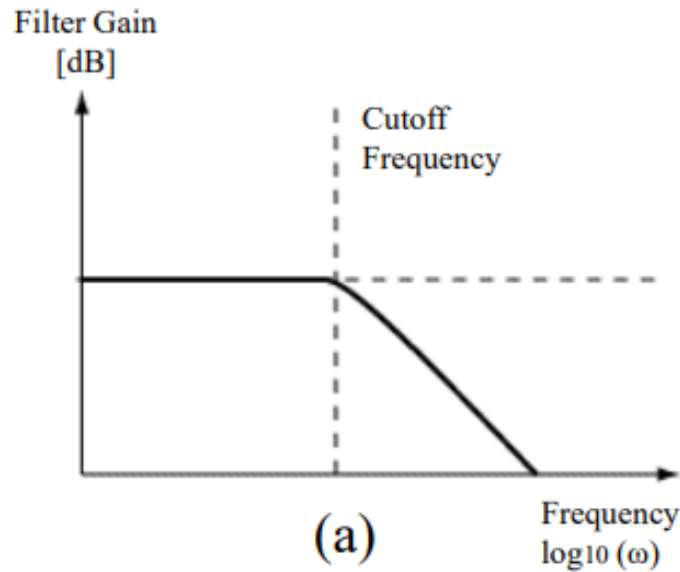
Example : 入力信号周波数 $f_{\text{in}} = 19.386$ [kHz]

f_s [kHz]	理想の場合の 剰余周波数 [kHz]	剰余周波数 [kHz] (ビン/FFTポイント数)			
		$t_{\max} = 1$ [ms]	$t_{\max} = 10$ [ms]	$t_{\max} = 100$ [ms]	$t_{\max} = 1000$ [ms]
3	1.386	1 (2/3)	1.4 (15/30)	1.39 (140/300)	1.386 (1387/3000)
5	4.386	4 (5/5)	4.4 (45/50)	4.39 (440/500)	4.386 (4387/5000)
7	5.386	5 (6/7)	5.4 (55/70)	5.39 (540/700)	5.386 (5387/7000)
11	8.386	8 (9/11)	8.4 (85/110)	8.39 (840/1100)	8.386 (8387/11000)
13	6.386	6 (7/13)	6.4 (65/130)	6.39 (640/1300)	6.386 (6387/13000)

Outline

1. 研究背景
2. 剰余系サンプリング
 - 中国の剰余定理
 - 剰余系サンプリングの原理
3. 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験への応用
 - 周波数分解能の向上
 - マルチトーン試験への応用
 - 高周波狭帯域デバイス試験への応用
4. まとめ

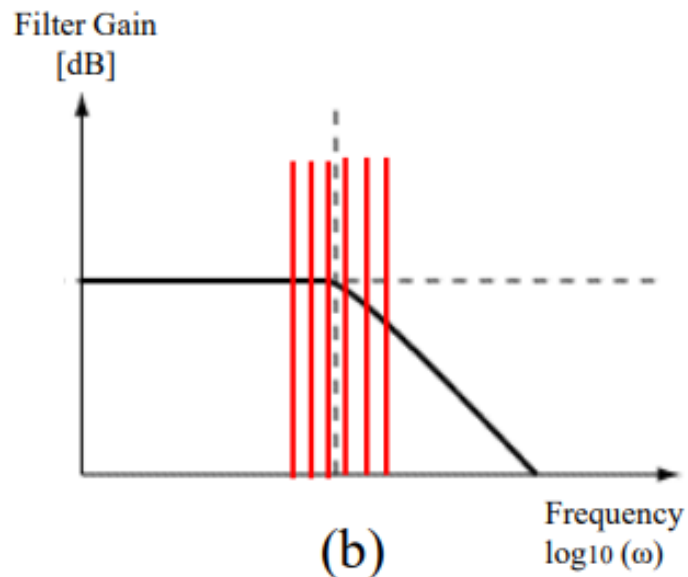
マルチトーン試験への応用 1



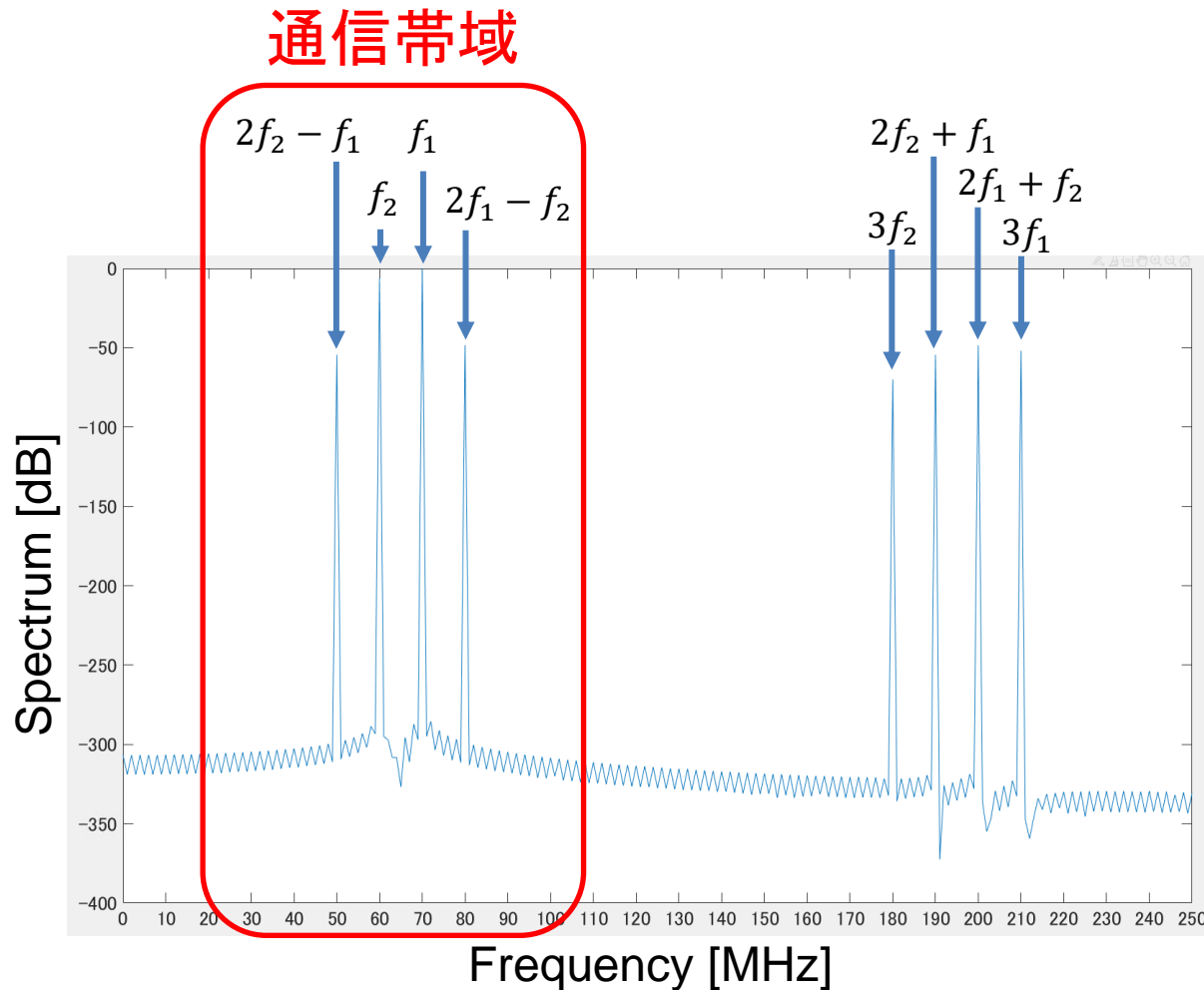
Ex) アナログ・ローパス・フィルタの
特性試験

(a) ゲイン特性

(b) カットオフ周波数近辺の周波数
を含むマルチトーンを生成
ゲイン特性を同時に測定する



マルチトーン試験への応用 2

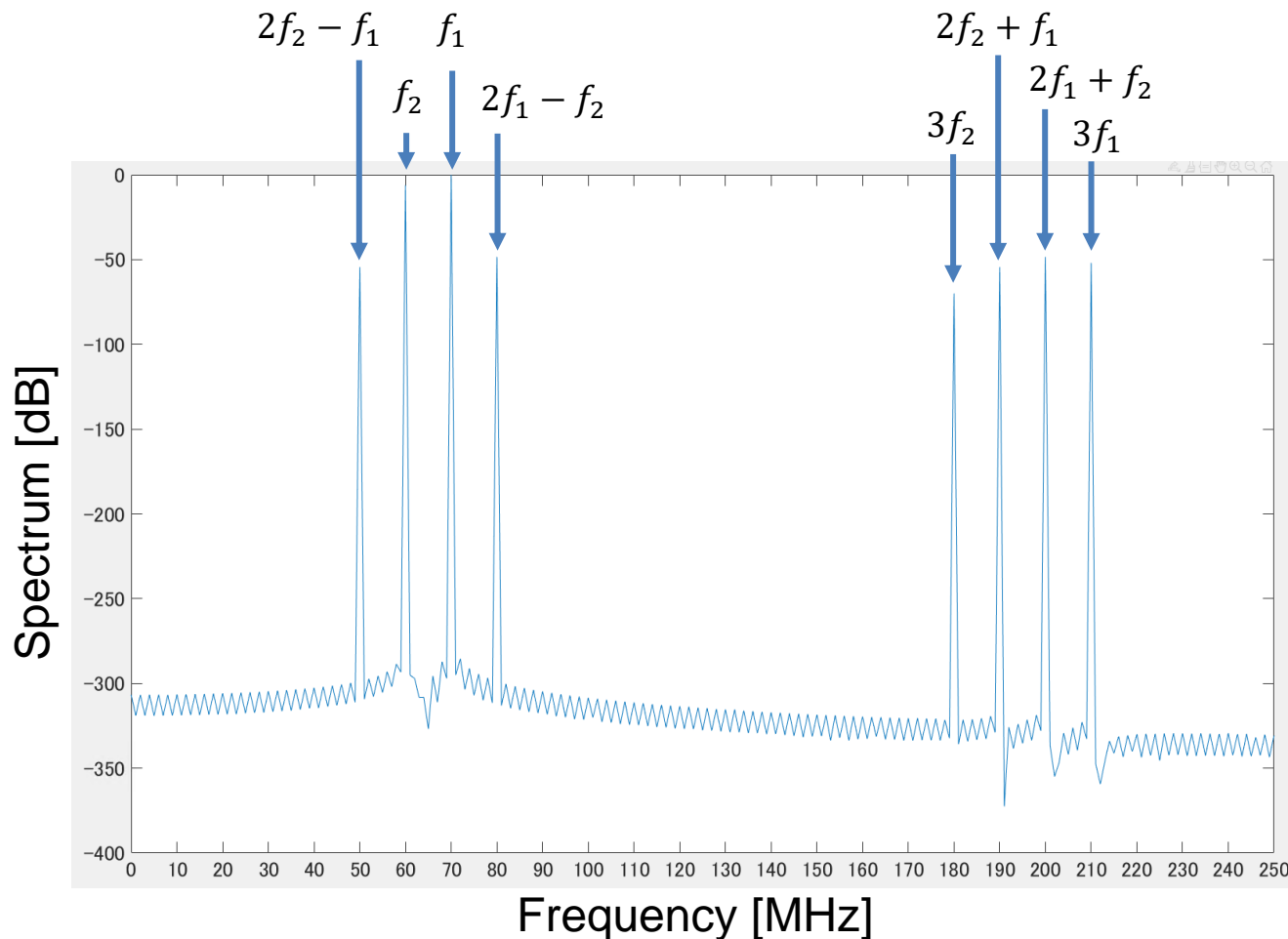


2トーン信号を印加すると
高周波デバイスの周波数歪は相互変調歪として現れる

2トーン試験 シミュレーション条件

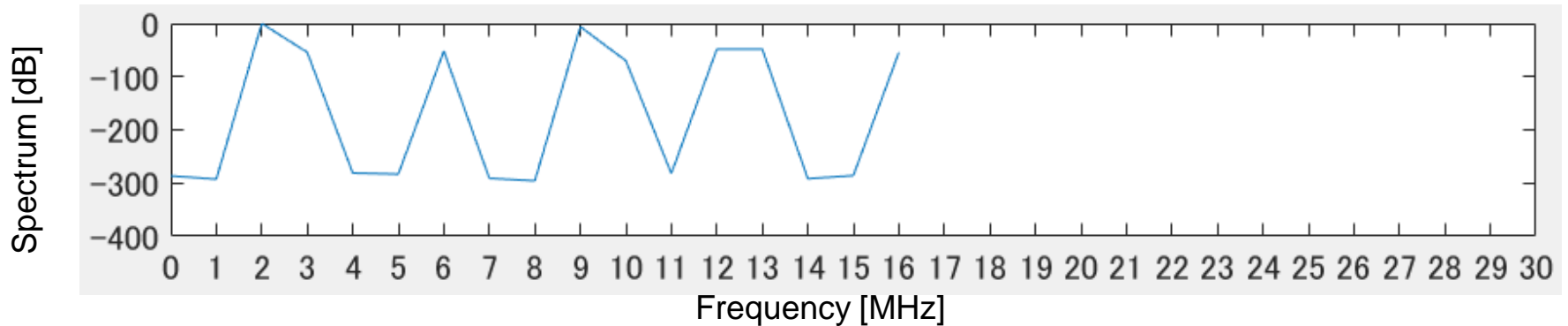
Input: $x(t) = \cos(2\pi f_1 t) + 0.5 \cos(2\pi f_2 t)$, $f_1 = 70$ MHz, $f_2 = 60$ MHz

Output: $y(t) = x(t) - 0.01 x(t)^3$



2トーン試験シミュレーション ($f_{s1} = 17 \text{ MHz}$)

サンプリング周波数: $f_{s1} = 17 \text{ MHz}$

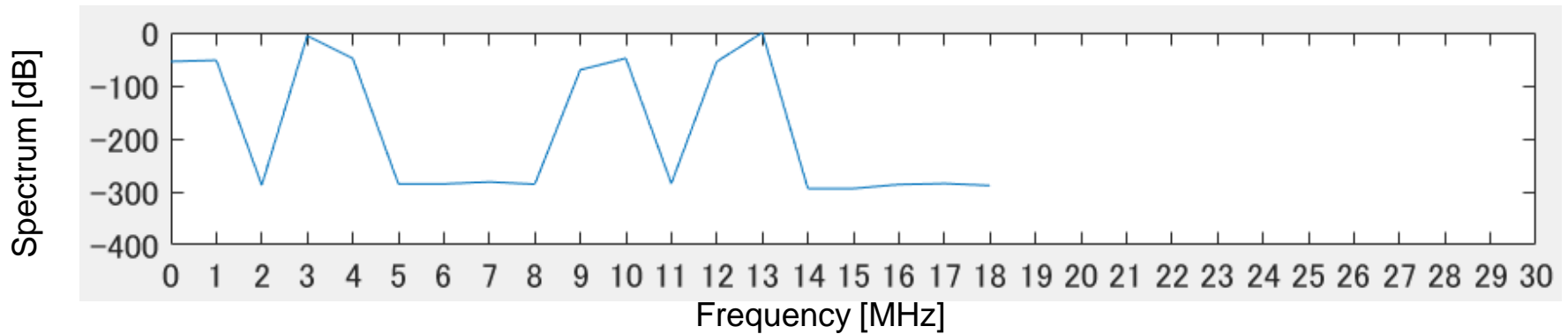


理論値		シミュレーション結果		
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
f_1	70	0.00	2	0.00
f_2	60	-6.07	9	-6.07
$3f_1$	210	-51.9	6	-51.9
$3f_2$	180	-70.0	10	-70.0

理論値		シミュレーション結果		
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
$2f_1 - f_2$	80	-48.4	12	-48.4
$2f_2 - f_1$	50	-54.4	16	-54.4
$2f_1 + f_2$	200	-48.4	13	-48.4
$2f_2 + f_1$	190	-54.4	3	-54.4

2トーン試験シミュレーション ($f_{s2} = 19 \text{ MHz}$)

サンプリング周波数: $f_{s2} = 19 \text{ MHz}$

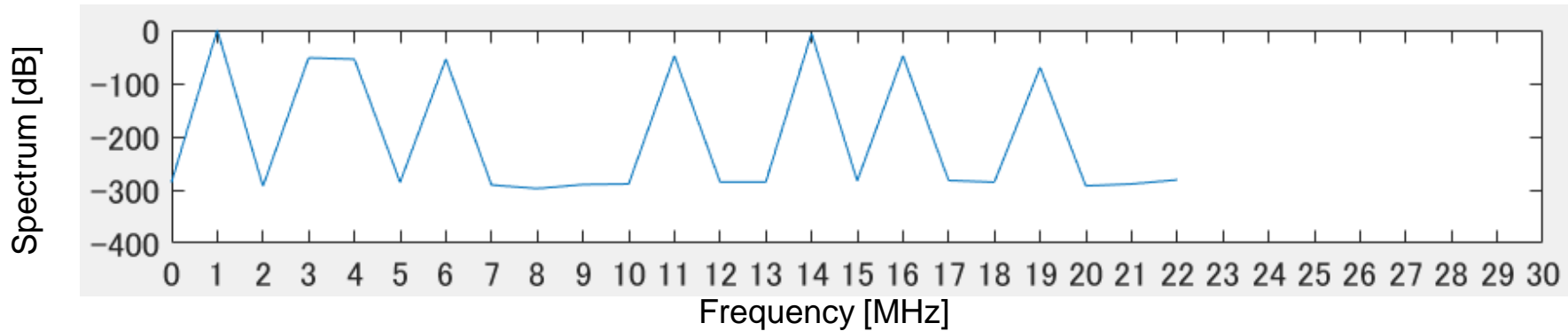


理論値			シミュレーション結果	
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
f_1	70	0.00	13	0.00
f_2	60	-6.07	3	-6.07
$3f_1$	210	-51.9	1	-51.9
$3f_2$	180	-70.0	9	-70.0

理論値			シミュレーション結果	
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
$2f_1 - f_2$	80	-48.4	4	-48.4
$2f_2 - f_1$	50	-54.4	12	-54.4
$2f_1 + f_2$	200	-48.4	10	-48.4
$2f_2 + f_1$	190	-54.4	0	-54.4

2トーン試験シミュレーション ($f_{s3} = 23 \text{ MHz}$)

サンプリング周波数: $f_{s3} = 23 \text{ MHz}$

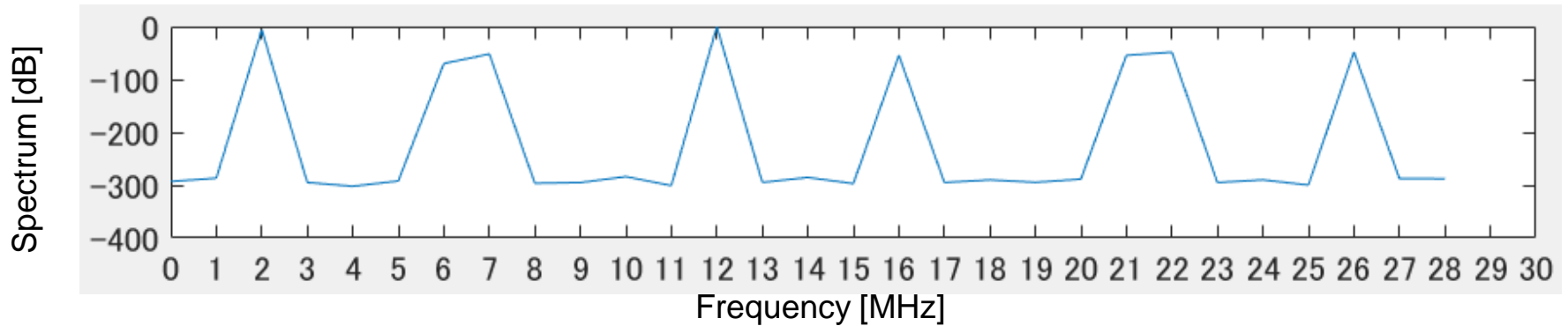


理論値		シミュレーション結果		
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
f_1	70	0.00	1	0.00
f_2	60	-6.07	14	-6.07
$3f_1$	210	-51.9	3	-51.9
$3f_2$	180	-70.0	19	-70.0

理論値		シミュレーション結果		
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
$2f_1 - f_2$	80	-48.4	11	-48.4
$2f_2 - f_1$	50	-54.4	4	-54.4
$2f_1 + f_2$	200	-48.4	16	-48.4
$2f_2 + f_1$	190	-54.4	6	-54.4

2トーン試験シミュレーション ($f_{s4} = 29 \text{ MHz}$)

サンプリング周波数: $f_{s4} = 29 \text{ MHz}$

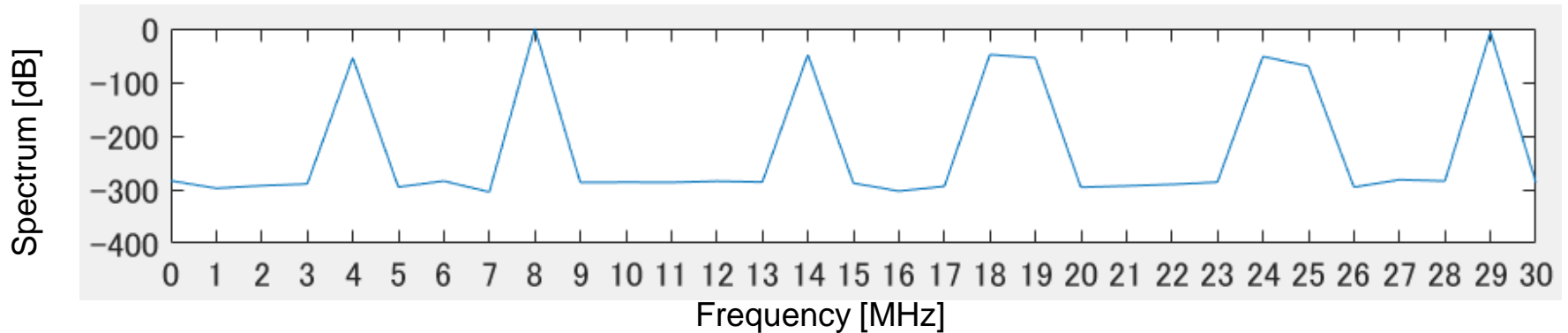


理論値			シミュレーション結果	
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
f_1	70	0.00	12	0.00
f_2	60	-6.07	2	-6.07
$3f_1$	210	-51.9	7	-51.9
$3f_2$	180	-70.0	6	-70.0

理論値			シミュレーション結果	
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
$2f_1 - f_2$	80	-48.4	22	-48.4
$2f_2 - f_1$	50	-54.4	21	-54.4
$2f_1 + f_2$	200	-48.4	26	-48.4
$2f_2 + f_1$	190	-54.4	16	-54.4

2トーン試験シミュレーション ($f_{s5} = 31 \text{ MHz}$)

サンプリング周波数: $f_{s5} = 31 \text{ MHz}$



理論値			シミュレーション結果	
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
f_1	70	0.00	8	0.00
f_2	60	-6.07	29	-6.07
$3f_1$	210	-51.9	24	-51.9
$3f_2$	180	-70.0	25	-70.0

理論値			シミュレーション結果	
	Freq. [MHz]	Power [dBc]	Residue freq. [MHz]	Power [dBc]
$2f_1 - f_2$	80	-48.4	18	-48.4
$2f_2 - f_1$	50	-54.4	19	-54.4
$2f_1 + f_2$	200	-48.4	14	-48.4
$2f_2 + f_1$	190	-54.4	4	-54.4

高調波, 相互変調歪の理論値
その剰余周波数におけるパワー → 一致

Outline

1. 研究背景
2. 剰余系サンプリング
 - 中国の剰余定理
 - 剰余系サンプリングの原理
3. 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験への応用
 - 周波数分解能の向上
 - マルチトーン試験への応用
 - 高周波狭帯域デバイス試験への応用
4. まとめ

高周波狭帯域デバイス試験への応用

Bluetooth basic rate (BR)

キャリア周波数: $2402 + k$ [MHz], $k = 0, 1, 2, \dots, 78$

チャンネル間隔: 1 MHz

送信信号: 1 Msps Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK)

BT積: 0.5

変調指数: 0.28 ~ 0.35

GFSK信号: 2.402 GHz ~ 2.480 GHz で周波数ホッピング

剰余系サンプリングを
ホッピング回路の試験に応用

剰余系サンプリング:

バンド幅 78 MHzより低いサンプリング周波数を使用

$f_s = 7, 11, 13, 17$ MHz

Bluetooth ホッピング回路試験 シミュレーション条件

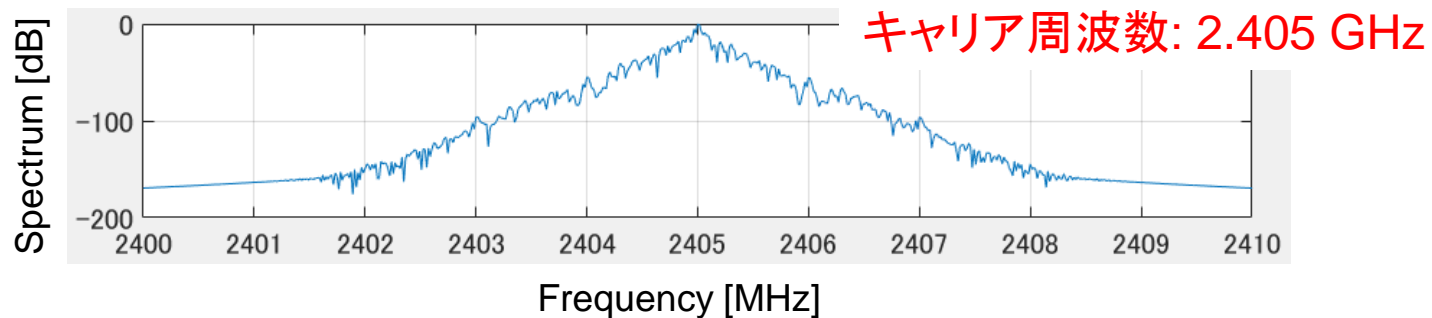
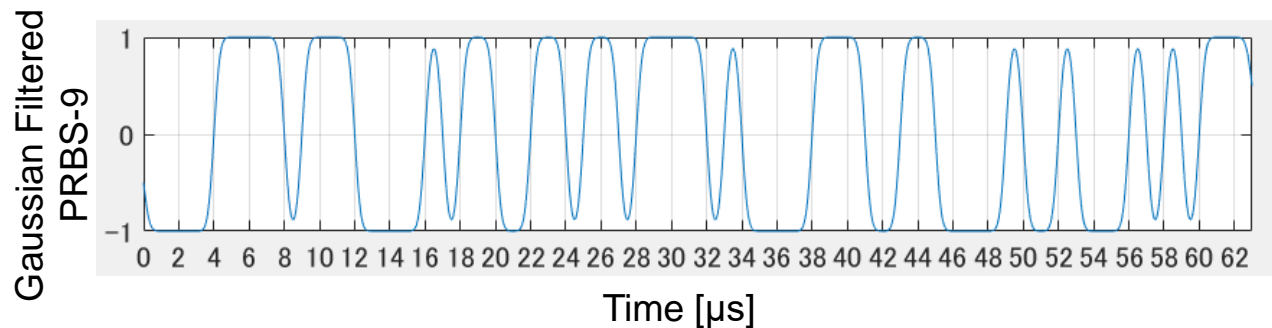
キャリア周波数: 2405 MHz

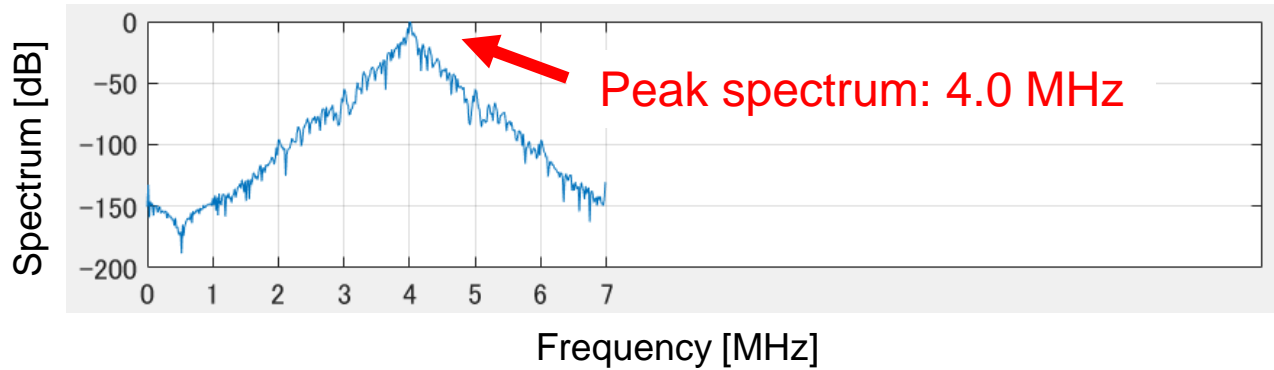
信号: Gaussian filtered PRBS-9 (BT = 0.5)

変調指数: 0.3

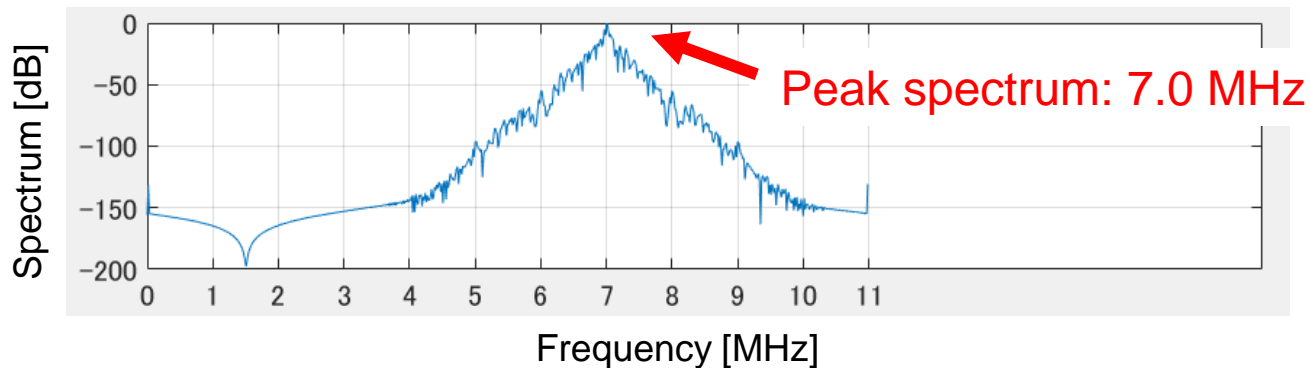
サンプリング周波数:

$$f_{s1} = 7 \text{ MHz}, f_{s2} = 11 \text{ MHz}, f_{s3} = 13 \text{ MHz}, f_{s4} = 17 \text{ MHz}$$

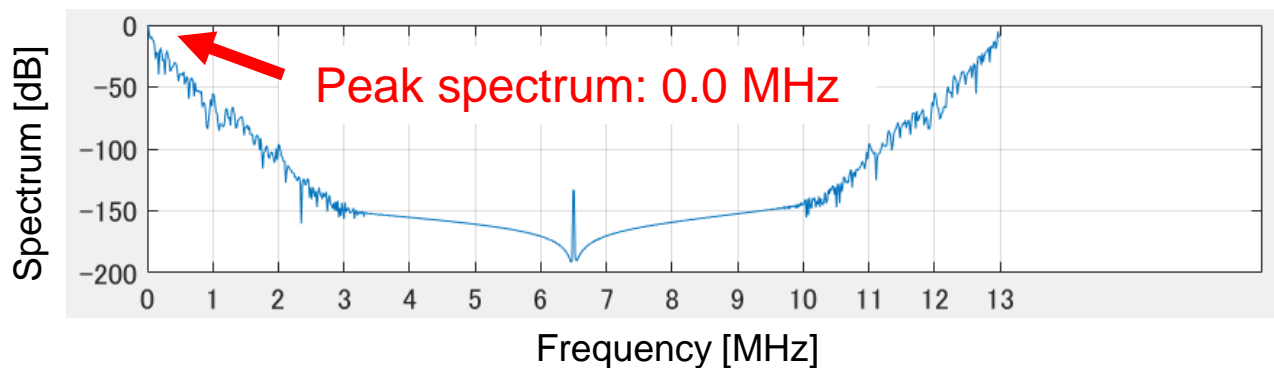


BTホッピング回路試験シミュレーション ($f_s = 7\text{MHz}, 11\text{MHz}$)サンプリング周波数: $f_{s1} = 7\text{MHz}$ 

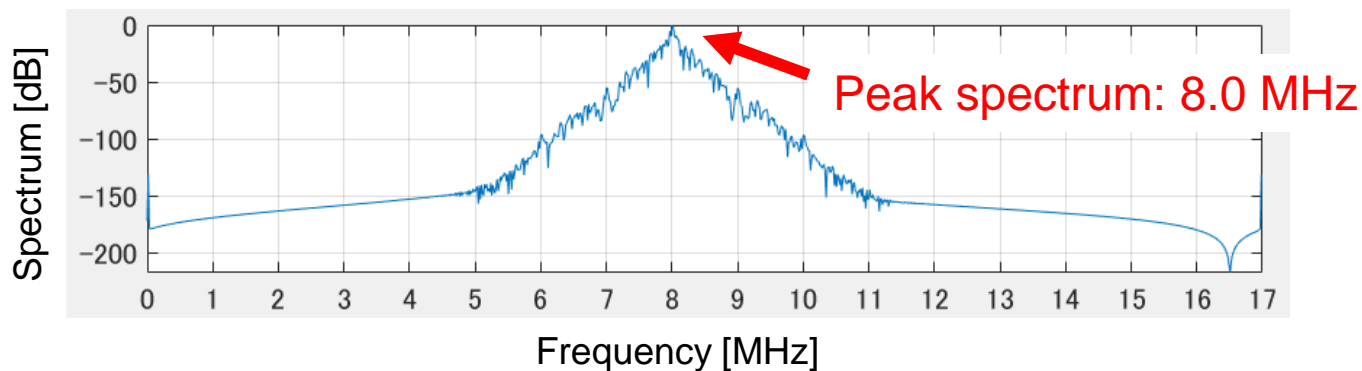
$$\text{mod}_7(2405) = 4$$

サンプリング周波数: $f_{s2} = 11\text{MHz}$ 

$$\text{mod}_{11}(2405) = 7$$

BTホッピング回路試験シミュレーション ($f_s = 13\text{MHz}, 17\text{MHz}$)サンプリング周波数: $f_{s3} = 13\text{MHz}$ 

$$\text{mod}_{13}(2405) = 0$$

サンプリング周波数: $f_{s4} = 17\text{MHz}$ 

$$\text{mod}_{17}(2405) = 8$$

剰余系サンプリングにより周波数ホッピング回路の試験が可能

Outline

1. 研究背景
2. 剰余系サンプリング
 - 中国の剰余定理
 - 剰余系サンプリングの原理
3. 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験への応用
 - 周波数分解能の向上
 - マルチトーン試験への応用
 - 高周波狭帯域デバイス試験への応用
4. まとめ

まとめ

- 剰余系サンプリング:
 - 高周波信号を複数の低周波クロックでサンプリング
 - ➡ 安価に高周波サンプリングを実現
- 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験に応用
 - サンプリング点数を増加 ➡ 周波数分解能が向上
(測定時間は長時間)
 - 2トーン信号試験:
 - 高調波, 相互変調歪の理論値
 - その剰余周波数におけるパワー } 一致
 - 高周波狭帯域デバイス試験:
 - 剰余系サンプリングにより
 - 周波数ホッピング回路の試験が可能

剰余系サンプリングの適用例と今後の課題

帯域 中心周波数 f_c	狭帯域		広帯域
	f_c 未知	f_c 既知	
適合性	最適	適	不適
適用例	Bluetooth ホッピング回路 テスト	狭帯域MTによる フィルタテスト	広帯域MTによる フィルタテスト
商 (折り返し回数)	未知	既知	未知・複数 (スペクトラムが重なる)
手法	ピーク等が 剰余系の組と 一致するか確認	Under samplingで可 複数のADCは不要	

狭帯域: サンプリングクロックより狭い帯域

広帯域: サンプリングクロックより広い帯域

Next

折り返したスペクトラムが重なる ➡ 剰余周波数のパワーが異なる場合あり
冗長なサンプリング手法, 重なったスペクトラムを分離する手法を検討

まとめ

- 剰余系サンプリング:
高周波信号を複数の低周波クロックでサンプリング
➡ 安価に高周波サンプリングを実現
- 高周波/アナログデジタル混載集積回路試験に応用
 - サンプリング点数を増加 ➡ 周波数分解能が向上
(測定時間は長時間)
 - 2トーン信号試験:
高調波, 相互変調歪の理論値
その剰余周波数におけるパワー } 一致
 - 高周波狭帯域デバイス試験:
剰余系サンプリングにより
周波数ホッピング回路の試験が可能

Number Theory for RF/AMS Testing



Carolus Fridericus Gauss
(1777-1855)

*“Number theory is
the queen of mathematics”*

Past Number theory

Beautiful and mysterious
NEVER practical

Current Number theory

For information communication processing
➔ good match to digital technology

Number theory application
for RF/AMS device testing is a frontier.
There are great chances for new discovering!