

テラヘルツ波帯の情報通信利用に関する調査検討会
近畿総合通信局 2010年2月2日

ミリ波アダプティブアレイアンテナの動向

李 可人 (Keren LI)

(独) 情報通信研究機構 (NiCT)
新世代ワイヤレス研究センター
keren@nict.go.jp

- I. ミリ波とミリ波無線通信システム
- II. ミリ波アダプティブアレイアンテナの基礎
- III. その最近動向

What's Adaptive Array Antenna?

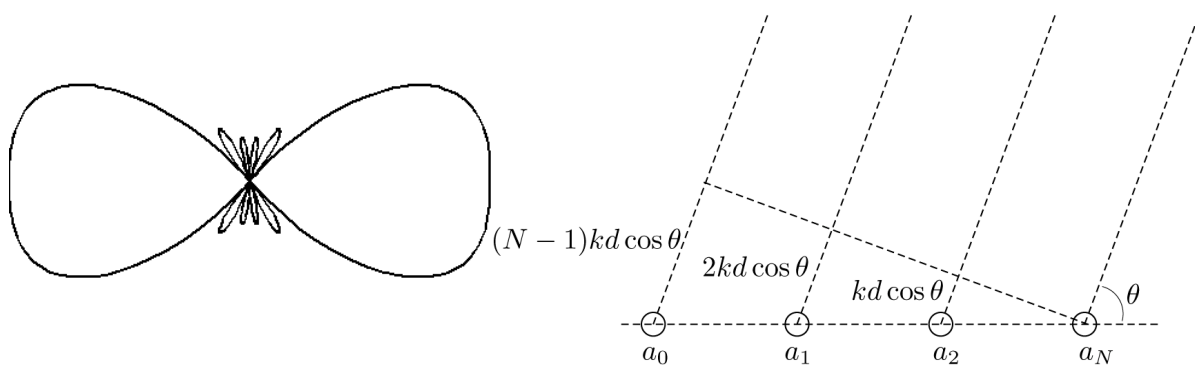
3

- アダプティブ・アレイ・アンテナ
- Adaptive Array Antenna
- 適応的 配列型 アンテナ

アダプティブアンテナの特徴

4

- 例：1次元アレイ (Linear Phased Array)



$$f(\theta) = a_0 e^{j(N-1) \overbrace{kd \cos \theta}^{\psi}} + a_1 e^{j(N-2)\psi} + \dots + a_N$$

■ アダプティブアンテナの主要機能

1. ビームフォーミング (Beam-forming) 機能
⇒ 目標発見、目標に集中、空間分解能を増加
2. ビームスキャン (Beam-steering) 機能
⇒ 目標発見、機械回転、位相制御の両方で可能
3. 干渉を回避する (Null-point形成) 機能

■ 本日の講演テーマ：

ミリ波アダプティブアンテナ
-- ミリ波無線通信への応用をメインに --

■ ミリ波アダプティブアンテナの主要機能

1. ビームフォーミング (Beam-forming) 機能
2. ビームスキャン (Beam-steering) 機能

■ ミリ波無線通信システムにおける

ミリ波アダプティブアンテナの役割

1. ビームフォーミング (Beam-forming) 機能
⇒ 空間伝搬ロスを軽減、多重干渉を防ぐ
2. ビームスキャン (Beam-steering) 機能
⇒ ミリ波遮蔽問題への対応、ユーザ探知

- ミリ波及び
- 近年のミリ波無線システム

What's Millimeter-wave ?

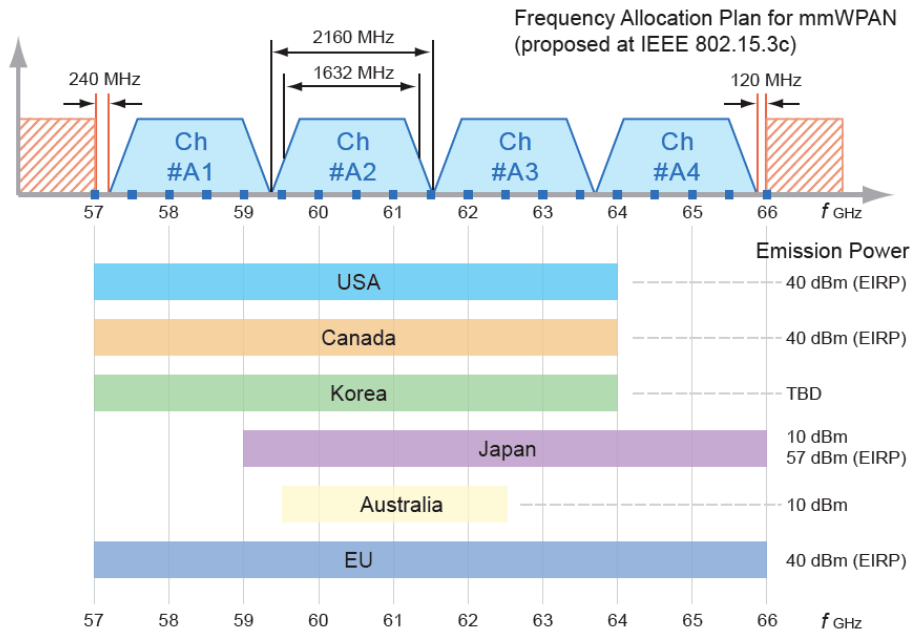
ミリ波・サブミリ波の定義

- **ミリ波** = Millimeter Wave (MMW)
- **波長** = 10mmから1mm (0.1mm)
(ミリ波の名前の由来, 0.1mm以下の波はサブミリ波と呼ぶ)
- **周波数** = 30GHzから3000GHz
- 比較に、普通の携帯電話に使用されている電波は：
周波数 = 0.7GHzから2GHz

- **周波数が高い (30GHz~300GHz, 3000GHz)**
⇒ 周波数が高い分、高速通信の潜在能力あり。
- **波長が短い (10mm~1mm, 0.1mm)**
⇒ 通信機器、特にアンテナの小型・軽量化が可能。
例：衝突防止ミリ波車載レーダ
- **利用可能な帯域が広い**
⇒ ミリ波では、周波数資源が豊富にあります。
例：日本での免許不要の60GHz帯ミリ波は59 ~ 66GHzの7GHz帯域が利用可能。一方、普及されている無線ランなどは数MHzから数十MHz程度。
- **直進性が強く、空間伝搬ロスが大きい**
⇒ 無線通信としては、不利。しかし、相互干渉が少ない、秘密性がよいなどの利点もあります。
例：近距離通信、室内高速無線

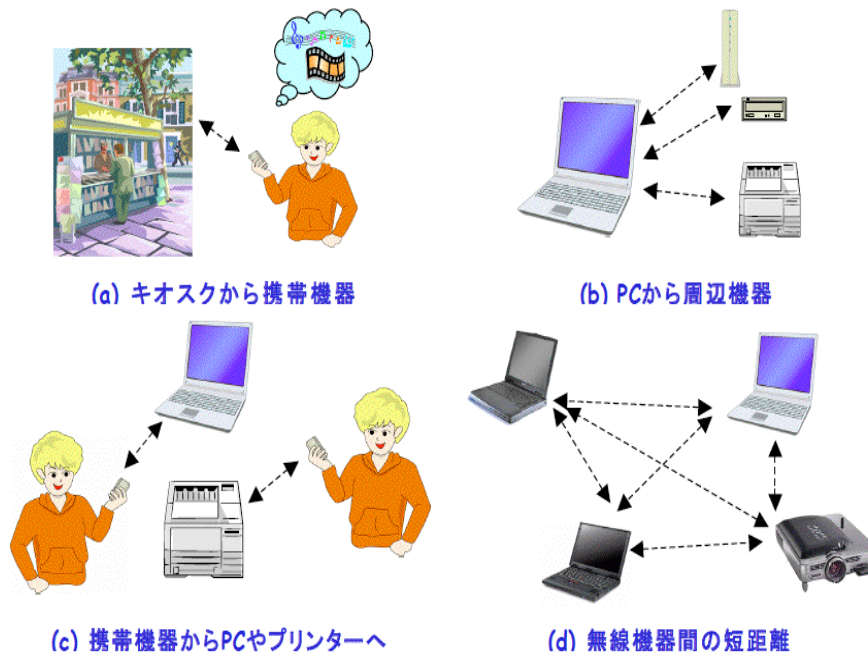
Why MMW Wireless System?

- **周波数資源の逼迫** = 低いマイクロ波周波数は、近年携帯電話や無線LANの普及に伴い、その周波数資源が年々足りなくなっています。
- **超高速無線通信への要求** = 無線や移動通信においても、光ファイバを使った有線通信に匹敵する高速通信の必要性が高まっています。
例：Wireless HDTV=2~4Gbps(非圧縮伝送)
- **小型、秘密性などの要望** = ミリ波の特徴に由来します。



- mmWPAN: Millimeter-wave Wireless Personal Network
- IEEE Standard Working Group for mmWPAN: 802.15.3c
<http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c.html>

ミリ波無線通信利用イメージ (Office等)



60GHz帯ミリ波がついに宅内民生市場へ パナソニックがWirelessHD対応テレビを発売 (2009/02/04) EETIMES Japan

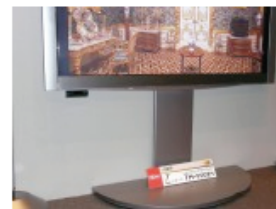
ミリ波は長い間電波の「ホープ」であり、「夢」であった。1999年に発刊された学術書「新ミリ波技術」のまえがきの一文である。これまで、軍事や自動車、産業といった限られた分野にのみ使われてきたミリ波が、いよいよ宅内の民生機器で使われる。パナソニックが60GHz帯のミリ波を使う無線通信規格「WirelessHD」に対応した映像・送信用ワイヤレス・ユニットを2009年4月に製品化する(発表資料)。

60GHz帯は、7GHzと広い周波数帯域を使えるという大きな特徴がある。この周波数帯域を活用すれば、1080pの高品位(HD)映像を非圧縮で伝送可能だ。ただしこれまでは、(1)部品コストが高い、(2)電磁波の直進性が強いという課題があった(参考記事)。部品コストが高ければ、民生機器には受け入れられない。直進性が強いと、宅内のリビング・ルームなど障害物が多い場所では使いにくい。

(1)については、60GHzに対応した半導体チップをCMOS技術で製造できるようになったこと、(2)については電波の指向性を動的に調整するビーム・ステアリング技術を導入したことが課題解決につながった(参考記事)。「2009年3月のテスト・センター設立を待って、WirelessHD規格の認証プログラムの認定を受ける。認定を受けてロゴを付与された後、販売を開始する」(同社の説明員)という。WirelessHD規格の認証プログラムを受けるのは、同社が初になる予定だ。



2009年2月に発表したチューナー外付け型薄型テレビのオプションに、ワイヤレス・ユニットを用意した。



受信側のワイヤレス・ユニットは、ディスプレイ部の左下に設置する。



ラックの最上段にあるのが送信側ワイヤレス・ユニットである。



チューナーやBlu-Ray Discプレーヤなどが手元で扱えることや、テレビ・ディスプレイの設置自由度が高まることを訴求していた。

ミリ波アダプティブアンテナ

- ミリ波アダプティブアンテナ
- その最近動向

■ ミリ波の弱点をメインに

- **直進性が強く、空間伝搬ロスが大きい**
⇒ 遮蔽に弱い。アンテナ利得なしで、
空間伝搬ロス：68dB@1m(60GHz)

- **デバイス性能の制限**
⇒ 出力パワーが低い。雑音が多い。

- **回路・実装技術の制限**
⇒ 回路による伝搬ロスも大きく、
また、実装による影響を強く受ける。

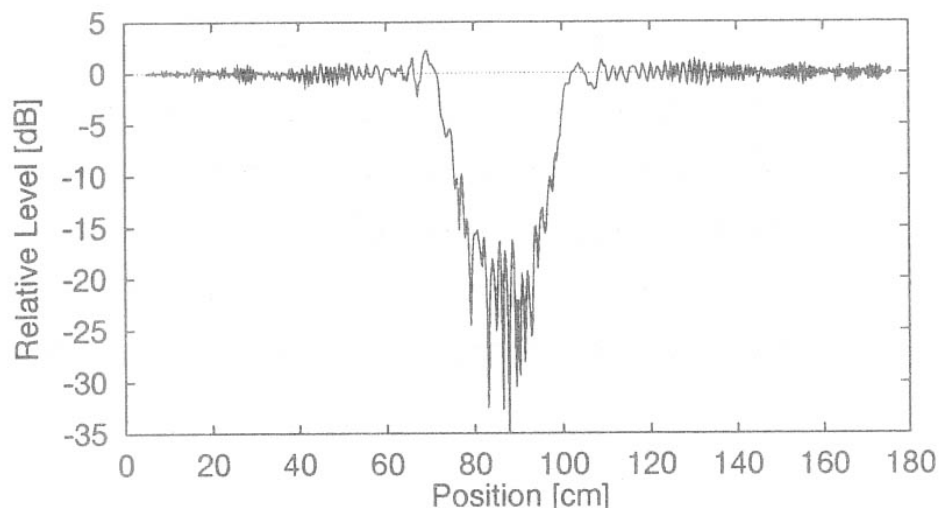
■ 可能な解決法

アンテナの
アレイ化
アダプティブ化

アンテナと
回路との
一体化
集積化
+ベースバンド

一例：人体による遮蔽

- 人体による直接波遮蔽の影響は大きく20dB程度の受信レベル低下が生じる(NICTデータ)



■ 近年のミリ波 Si CMOSのめざましい進展により

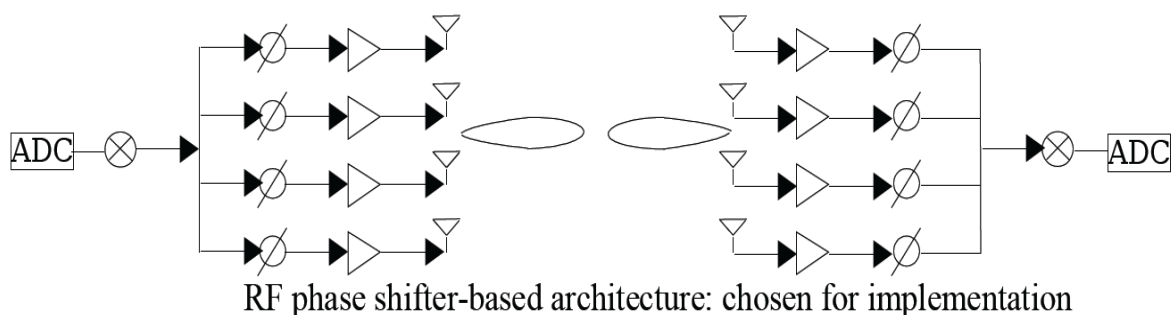
- ⇒ Si CMOSがミリ波帯域での動作が可能に
- ⇒ ベースバンドとの一体化も視野に

■ システムと一体化した ミリ波アダプティブアンテナのモジュール化・チップ化 が可能に

1. ビームフォーミング (Beam-forming) 機能
2. ビームスキャン (Beam-steering) 機能

アダプティブアンテナの基本構成

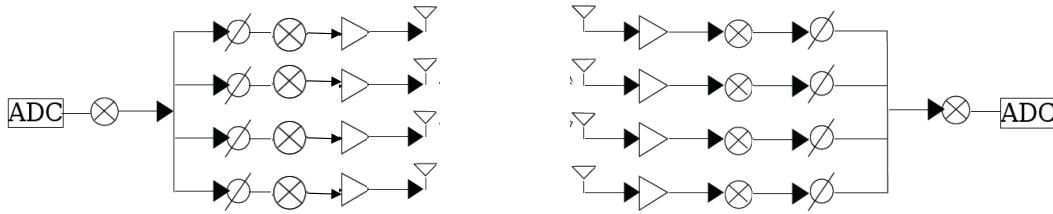
■ RF phase shifter array



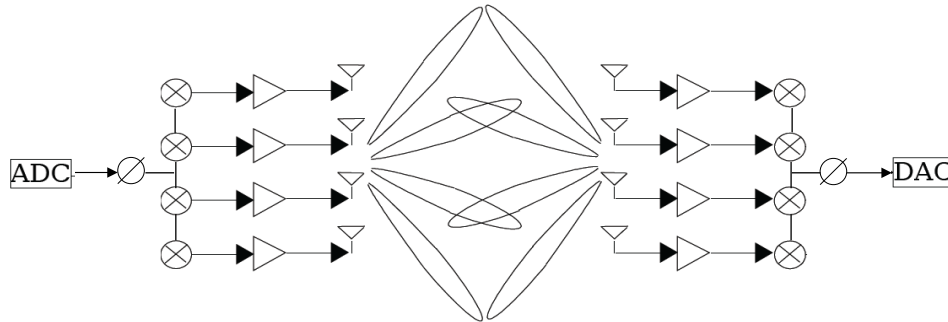
Advantage: less power consumption,

Disadvantages: full-angle switchable phase shifter with small delay and loss in 60GHz is not available in the market, what's more, quite big challenging to implement.

IF phase shifter array

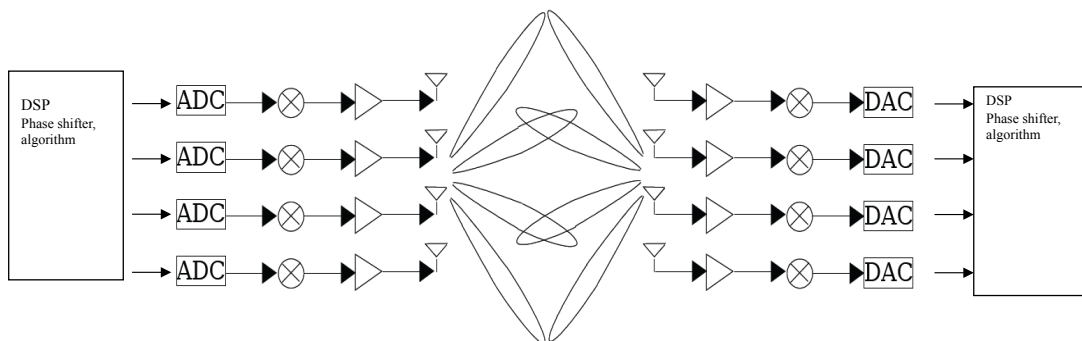


Increase the area, reduce the requirements in RF side



Using phase shifter to reduce the phase shifter loss in the signal path

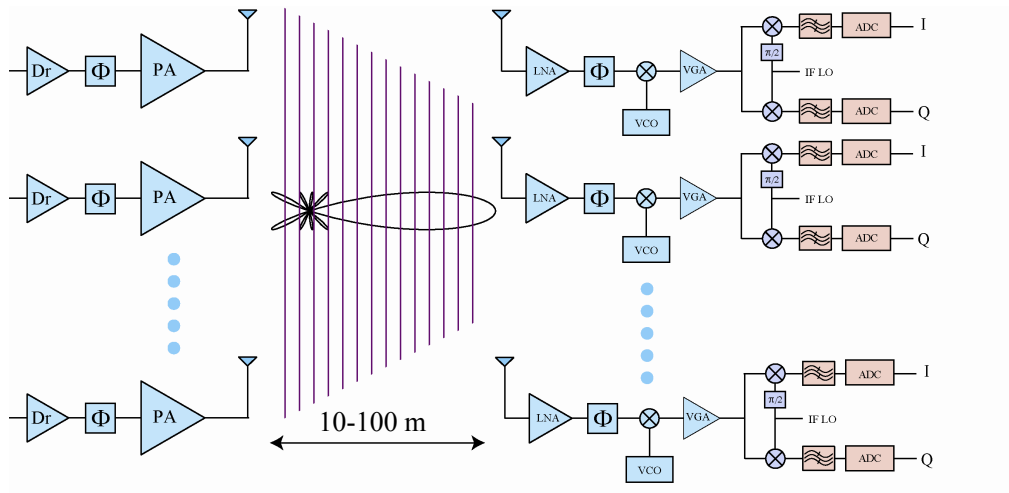
Digital beamforming



N transmitters forming N independent beams, suitable for MIMO systems (as shown N=4)

Advantage:

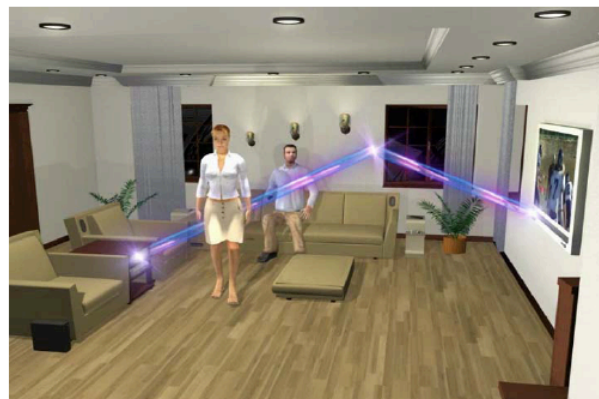
Less complexity in the RF front end trade of by high power consumption



出典： Berkeley Wireless Research Center

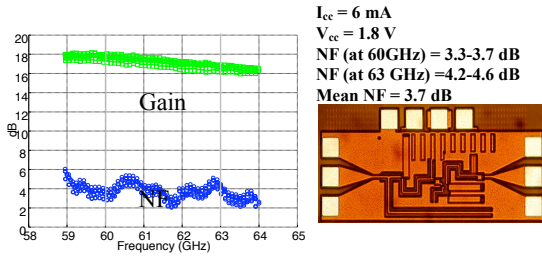
WirelessHDの提案

1. Coordinator auto-discovers what devices are in WWAN
2. Device capabilities exchanged
3. Coordinator allocates time for communications between Stations
4. Continuous monitoring of WWAN and stations within or joining/leaving WWAN

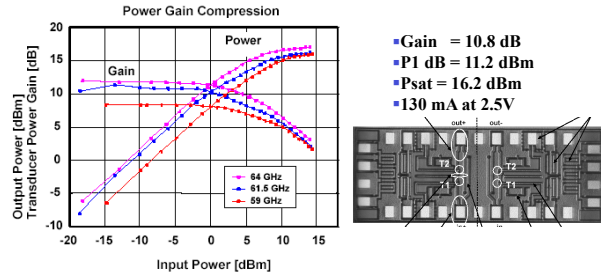


Si (SiGe) ミリ波デバイスの例 (IBM)

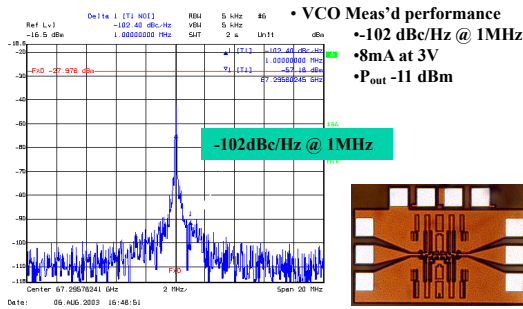
Low Noise Amplifier



Power Amplifier

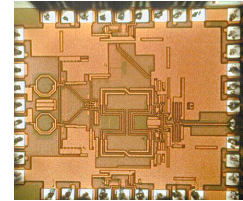


Voltage Controlled Oscillator



Direct Conversion Mixer

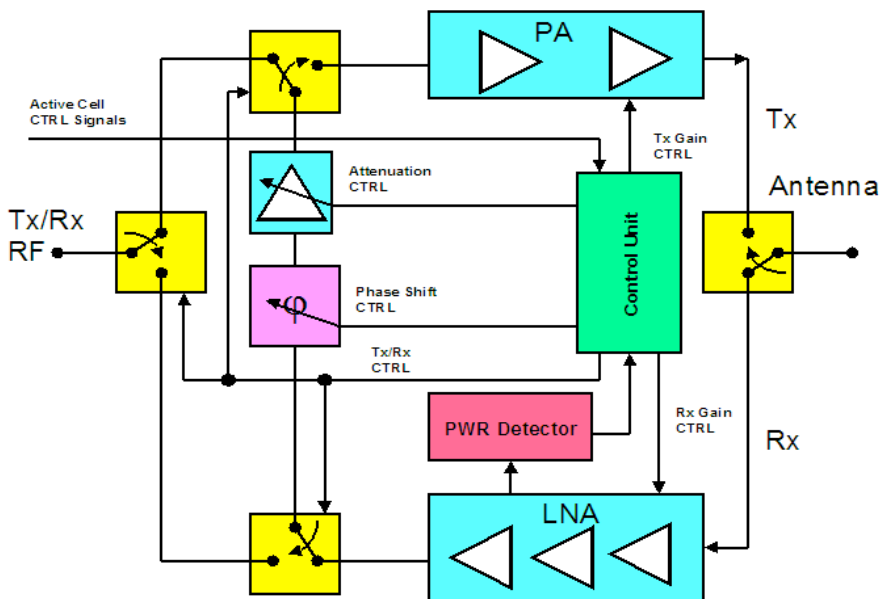
- First Gilbert-cell mixers at 60 GHz.
- Highest integration level for any technology at 60 GHz.
 - 80 transistors
 - 43 transmission lines or inductors
- Meas'd performance comparable or exceeding GaAs
 - NF (< 15 dB),
 - conversion gain (> 16 dB),
 - V_{cc} = 2.7V
 - power (150 mW "core")



Output Spectrum / Phase Noise

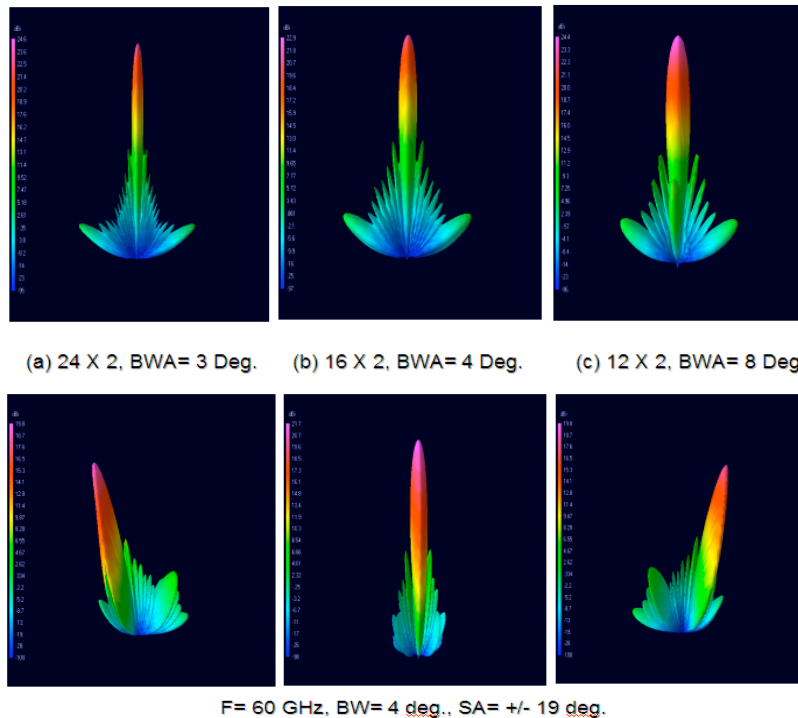
ISSCC 2004

アダプティブアンテナ構成例

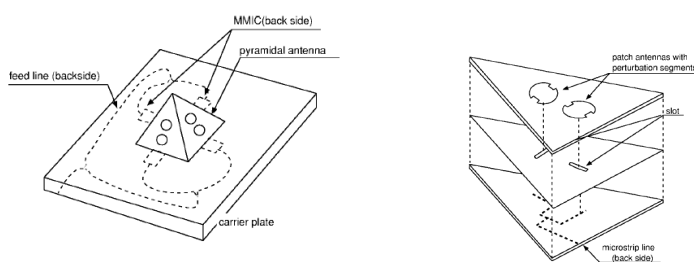


F. Mohamadi, "Wafer Scale Integration," RF Design, February 2005, pp 48-62

出典: IEEE802.15-05/125r0: 15-05-0124-00-003c-mm-wave-beamforming



Multi-section Selection Circuits



(a) 3-D view (b) each paired-element patch antenna on an isosceles-triangular plate.

- Proposed by Toshiba Co., to cover the 360 ° of Azimuth plane in 1998
- the minimum gain of 5.4dBi and less than 2.5dB axial ratio at frequency 59 – 60GHz. 2dB gain difference between simulation and fabrication.
- Loss caused by MS is 0.3dB (substrate PTFE, $\epsilon_r=2.2$, $h=0.127\text{mm}$, element space 0.55l @ 59.5GHz)
- switch is realized by on and off status of amplifier

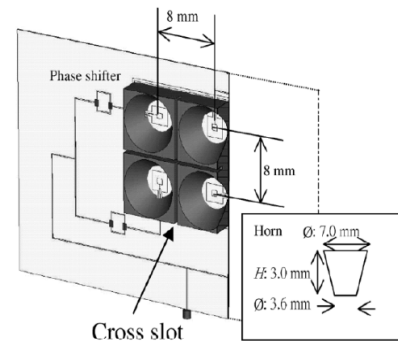
P. F. M. Smulders, M. H. A. J. Herben, J. George, "Application of five-sector beam antenna for 60GHz wireless LAN," <http://www.brabantbreedband.nl>

Y. Murakami, T. Kijima, H. Iwasaki, T. Ihara, T. Manabe and K. Ligusa, "A switchable multi-sector antenna for indoor wireless LAN systems in the 60GHz Band", IEEE Trans. Micro. Theory Tech., 1998, MTT- 46, pp. 841-843.

Circular-Pol Microstrip-Horn Antenna

29

K. C. Huang and Z. C. Wang, "Millimeter-wave circular polarized beam-steering antenna array for Gigabit wireless communications," *IEEE Trans. Antennas & Propag.* vol. 54, no. 2, Feb. 2006, pp. 743- 746

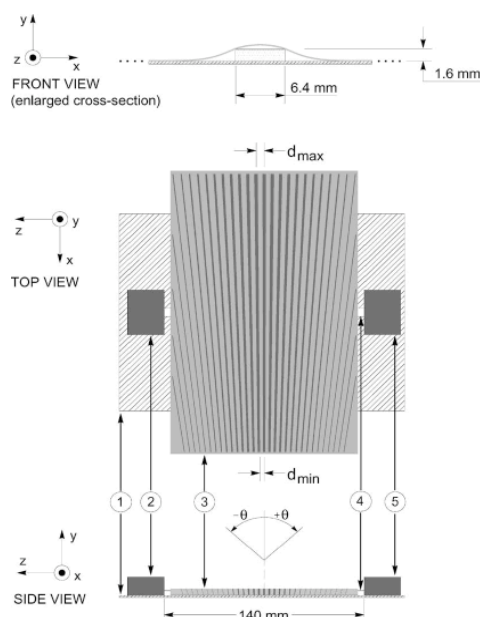


- 4 element beam steering antenna with right-handed circular polarization at 61GHz is realized with the 14dBi directivity, 7dBi gain and -10 to 10 degree steering range.
- ceramic substrate with $\epsilon_r=10$
- the four patches with truncated-corners are designed for the RHCP
- the 90 phase shifter is made by two SPDT switches and two microstrip-lines.
- The radiation of the phase shifters and microstrip lines is shielded by a metallic cover to avoid mutual couplings.
- It was also reported that the horn could increase 8dB gain in the main beam direction and the transmission loss of gold microstrip line on ceramics was 0.57dB/cm at 61GHz
- the 61GHz switches from Northrop Grumman Space Technology with wire bonding measured loss was 3dB.
- the SDH126 is 55-62GHz SPDT switch found from Northrop Grumman.

Leaky Wave Beam-steering Antenna

30

The slow-wave supported grating antenna could be the candidate for the low-cost millimeter-wave beam-steering antenna with changing the space of each grating space.

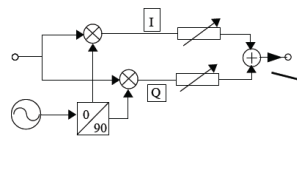


A $\pm 50^\circ$ beam steering at 40GHz was realized by changing the slot space with physically rolling up and down of part c. It was indicated in the paper that this method could be extended to 120GHz millimeter wave application. The measured gain could be reached to 18dBi in considered band 35-40GHz. However, it is not implemented by electronic controlling

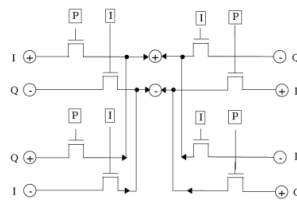
C. T. Rodenbeck, M. Li and K. Chang, "Design and analysis of a reconfigurable dual-beam grating antenna for low-cost millimeter-wave beam-steering", *IEEE Trans. on Antenna & Propag.*, vol. 52, no. 4, pp. 999-1006, April 2004

Block Based Antenna

31



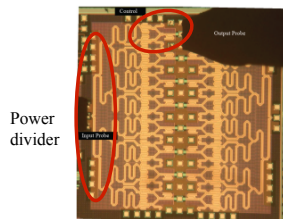
(a) Phase selector circuit



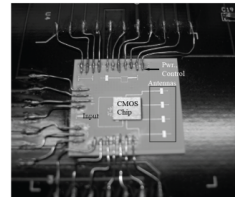
(b)

Output Phase (deg.)	Signals	Output Phase (deg.)	Signal
0	I	180	-I
45	I+Q	225	-I-Q
90	Q	270	-Q
135	-I+Q	315	I-Q

(c)



(d)



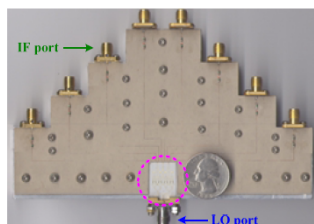
(e)

Phase shifter part was designed and integrated in CMOS chip
Phase shifter was realized by vector modulation method to fulfill 8 phases 45° one step

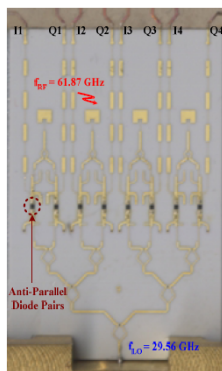
S. H. Alalusi, "A 60GHz Adaptive Antenna Array in CMOS", Ph.D thesis

Digital Beam Forming

32

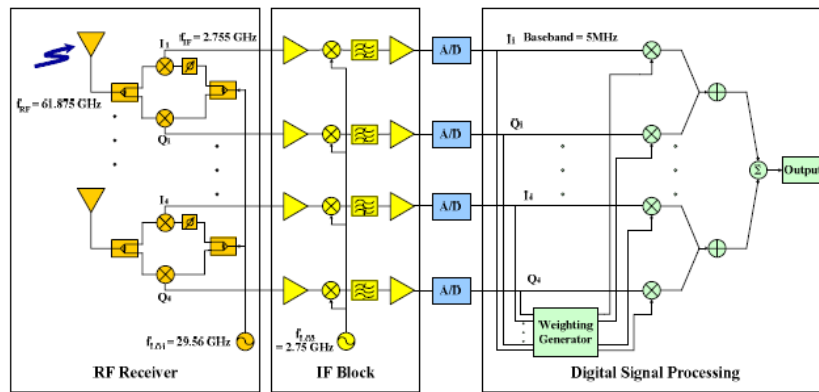


(a)



- A 60GHz integrated four-element planar antenna array with digital forming
- The system is realized by 60GHz four planar patches with second harmonic of I/Q mixers @ 29.65GHz, combining with the IF mixer and amplifier, A/D and digital beamforming processing.
- The system transmission loss in RF lines and components is less than 16dB.
- Sub-mixer came from GaAs beam lead schottky barrier (HSCH-925)
- Patch antennas are fabricated on Duroid 5880 $\epsilon_r=9.8$, $h=0.127\text{mm}$, 1.7GHz frequency bandwidth
- RF front end conversion loss is from 10-16dB
- IF conversion loss is around 10.6dB
- The group also did some extension work for sub-band sampling to realize 500Mbps/s system using 20MHz sampling rate DSP

I. Park, Y. Wang, T. Itoh, "A 60GHz integrated antenna array for high-speed digital beamforming applications," <http://www.Mwlab.ee.ucla.edu>.



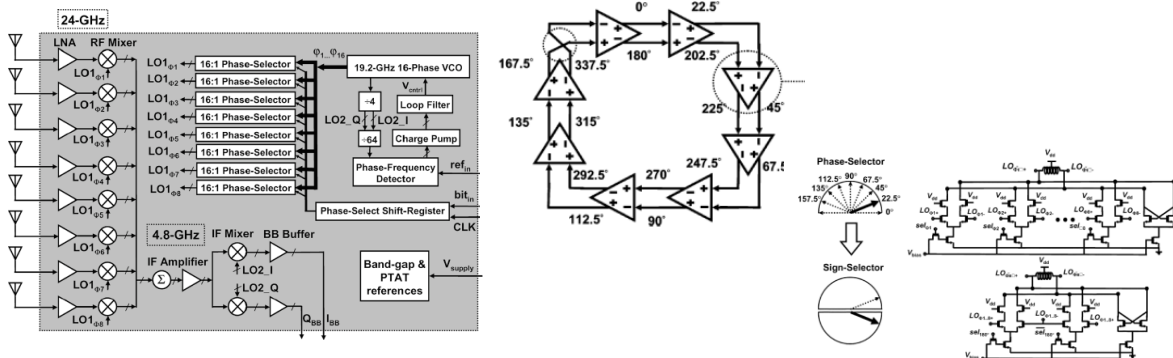
The output signal is combined by:

$$f(\theta) = \mathbf{W}_{smi}^H \mathbf{v}(\theta) \cdot e(\theta)$$

The digital oscilloscope of sampling rate 200MS/s is used as A/D, I/Q baseband 5MHz bandwidth, Matlab simulator is functioned as digital processor here, the final designed system can realized -25° to 25° beam scanning

I. Park, Y. Wang, T. Itoh, "A 60GHz integrated antenna array for high-speed digital beamforming applications," <http://www.Mwlab.ee.ucla.edu>.

Full-Integrated Phased Array on Silicon



A fully integrated 24-GHz eight-element phased-array receiver in silicon with LO path

The phase shifter is working on saturation condition to ensure the gain of each element doesn't vary so much with phase, The additional advantage is to reduce the requirements of phase shifters linearity, noise figure and bandwidth.

The phase shifter with 4 bits solution was realized and the whole system performance with 61dB gain of 8 paths and 46dB gain in one single path as well.

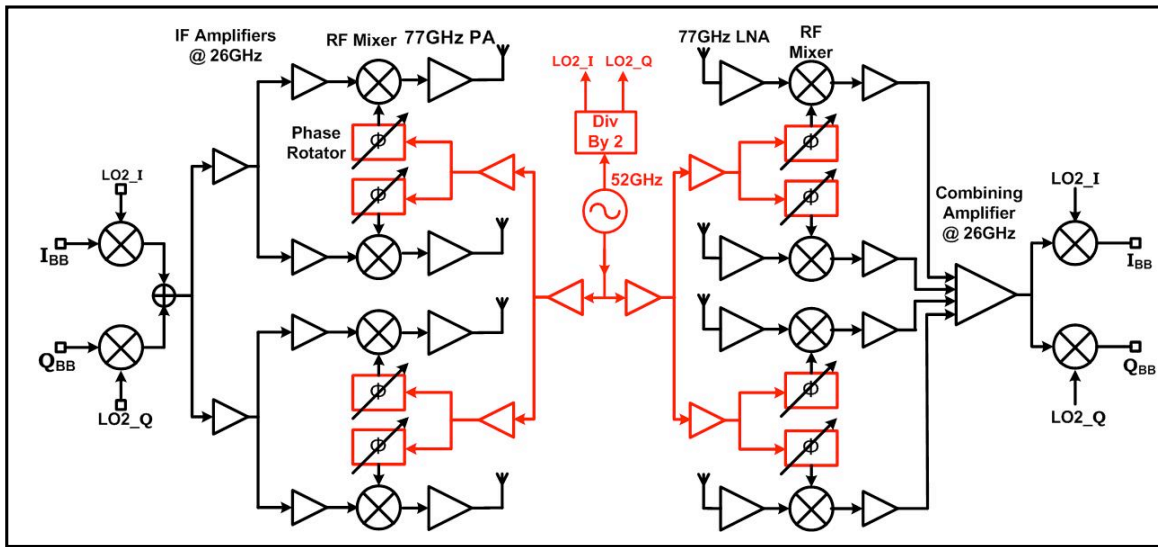
The phase shifter was designed as the round 8 amplifier, with the step 22.5 degree, which was realized by variable LC determined by the formulae

$$\Delta\Phi = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{L\omega_{osc}}{R(1 - LC\omega_{osc}^2)}$$

H. Hashemi, X. Guan, A. Komijani, A. Hajimiri, "A 24-GHz SiGe phased-array receiver- LO phase-shifting approach", IEEE Trans. MTT, vol. 53, no. 2, pp 614 – 626, Feb. 2005.

Integrated Transceiver Architecture

35

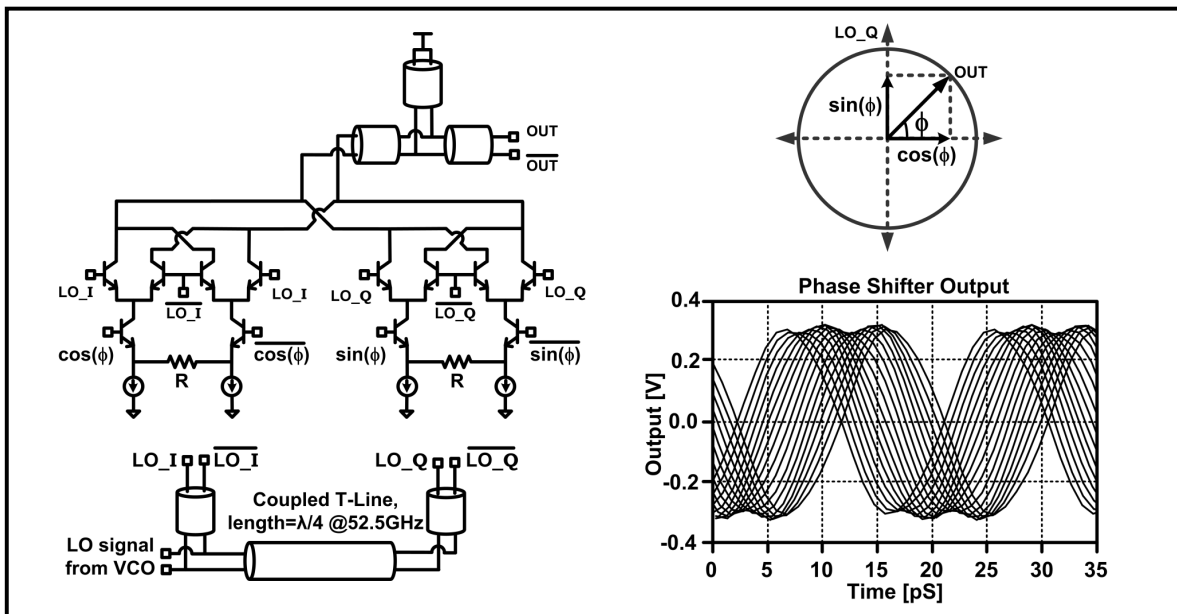


- Fully-integrated 4-element 77GHz phased-array transceiver on
- Two-stage frequency translation. (LO1: 52GHz, clock frequency 50MHz, IF=LO2: 26GHz)
- Local phase shifting in each element enables beam steering.

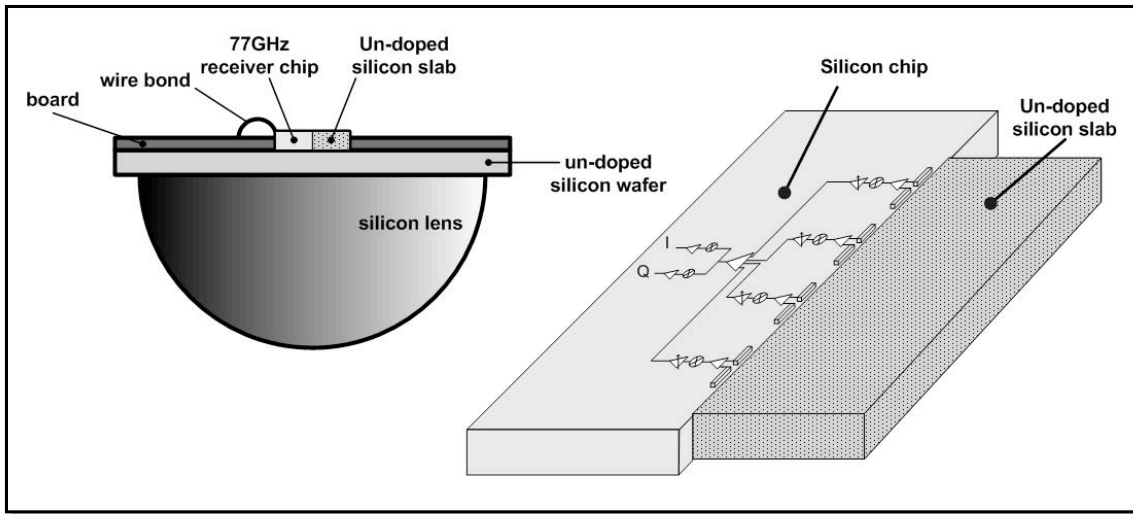
A. Babakhani *et al.*, "A 77GHz 4-Element Phased Array Receiver with On-Chip Dipole Antennas," ISSCC 2006.

52GHz Phase Rotator

36



- Quadrature signal generated locally using a delay
- Phase-shifter resolution limited by DAC resolution



- Silicon chip is thinned down to 100 μ m, floor plan issues lead to edge antennas
- A 500 μ m silicon wafer for mechanical stability
- Low frequency signals using wire-bond and board traces

A. Babakhani, X. Guang, A. Komijinai, A. Natarajan and A. Hajimiri, "A 77-GHz Phase-array transceiver with on-chip Antenna in silicon: receiver and antenna", IEEE J. Solid State, no.41, no. 12, Dec. 2006

ミリ波WPAN用広帯域平面アンテナ

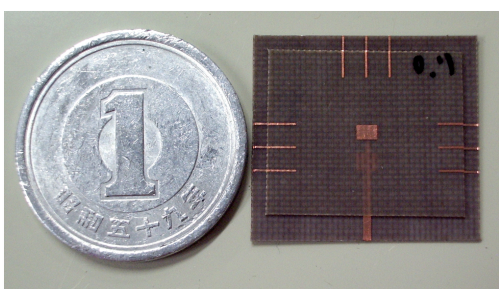
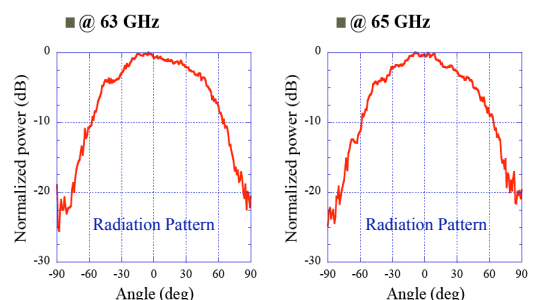
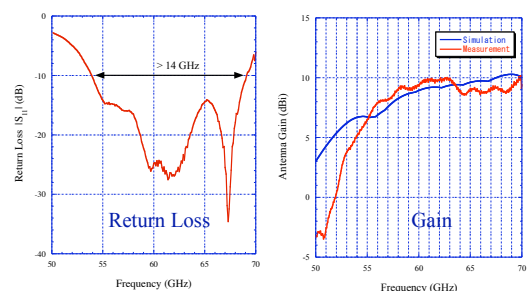


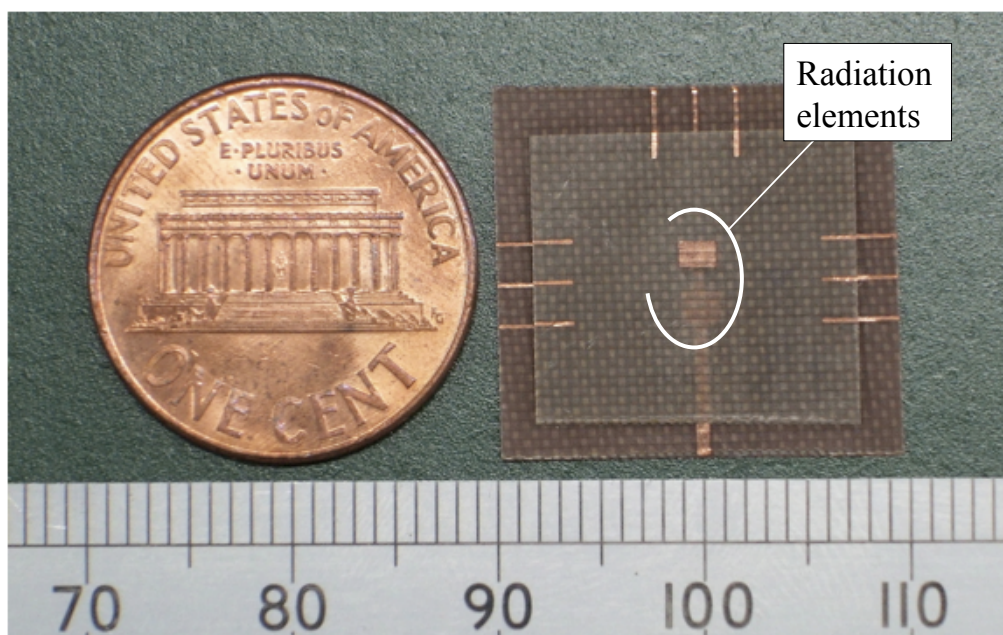
写真:ミリ波広帯域アンテナ試作品(NICT)

アンテナの主な特性と特徴

- 14GHz以上の広帯域:
 - 日米欧で割当てられているライセンス不要のミリ波周波数帯 (日本: 59-66GHz、米国: 57-64GHz、欧州: 57-66GHz) のすべてを1つのアンテナでカバー可能
- 小型・軽量・薄型(厚さ:0.5mm)
- 高い放射効率及び比較的大きなアンテナ利得(9dBi以上)
- 平面構造であり、半導体素子や他の回路への組み込み・集積が可能

アンテナの実測例 Measured Performances





Keren Li, Tomoaki Sato, and Naoki Kajitani, "Wideband Planar Antennas for Millimeter-Wave Wireless Communications," 2008 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation and 2008 USNC/URSI National Radio Science Meeting, Session: Wideband Microstrip Patch Antennas, no. 505-2, San Diego, California, USA, July 5-12, 2008.

まとめ

- ミリ波を使った高速無線通信システムは、高速・大容量の可能性をひめている。
- ミリ波アダプティブアレイアンテナは、ミリ波高速無線システムを実現する上での重要なデバイスである。
- ミリ波Siデバイス及びその集積化技術がミリ波アダプティブアレイアンテナに新たな可能性をもたらしている。
- 新しいミリ波アダプティブアレイアンテナ（構成・プロセス・デバイス作成・モジュール化・パッケージング・ベースバンドとの一体化など）の課題がまだ沢山残っている。

Special Thanks to

Dr. Jing Gao, Dr. Hiroshi Harada, NiCT

ご静聴、ありがとうございました。

独立行政法人 情報通信研究機構
新世代ワイヤレス研究センター
主任研究員 李 可人 keren@nict.go.jp