

銅ボールを用いたミリ波信号の基板間伝送技術の 60GHz 帯パッチアレイアンテナへの応用に関する研究

Application of the inter-substrate signal transmission technology using copper balls to 60-GHz-band patch array antenna



吉田 賢史 (Yoshida Satoshi, Ph. D.)
鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系・助教
(Research Field in Engineering, Science and Engineering Area,
Research and Education Assembly, Kagoshima University.)
IEEE, 電子情報通信学会

受賞：電子情報通信学会・第74回学術奨励賞受賞 (2012.03).

IEEE Japan Council AP-S Chapters Young Engineer Award
受賞 (2014.12).

研究専門分野：マイクロ波，ミリ波工学，アンテナ工学，

3次元実装工学

あらまし

次世代移動通信システムである 5G においては，28 GHz 帯での通信が利用されるなど，より高い周波数帯での通信が普及しつつある．将来的にはさらに高い周波数帯の利用も想定されるため，それらの周波数帯利用に関しての研究開発が望まれる．本稿では，60 GHz 帯におけるビームフォーミングアンテナの実現を大きな目的とし，直交 2 点給電パッチアンテナ素子を用いたアレイアンテナの銅ボール接続実装技術および 3 次元指向性測定技術の検証実験を行った結果について報告する．アレイ構成は 2×2 とし，素子間隔は 60 GHz における 0.6 波長，3.0mm とした．電磁界シミュレーションにより，給電位相差を 45 度きざみで変化させた場合の利得が 10 dBi 以上となる領域を評価し，ビームフォーミングアンテナとしての動作を確認した．さらに，銅ボール接続実装技術を用いて，2 枚の多層基板を積層実装し，電磁界シミュレーションと同様の評価を測定でも行った．その結果，全 8 個

の端子から信号が出力される場所，5 個の端子のみから信号が出力され，その結果を用いて放射パターンを得た上で，利得が 10 dBi 以上となる領域を評価した．

1. はじめに

ミリ波帯はマイクロ波帯の周波数帯に比べてより広い帯域を利用可能であることから，超高速無線通信への応用が期待されている．ミリ波帯の中でも 60 GHz 帯は，IEEE802.11ad などの規格が策定され，製品も市場に出回りつつある．ビームフォーミング技術は，60 GHz 帯の伝搬特性を考慮すると重要な技術であり，CMOS チップと組み合わせたシステムとしての提案 [1] もなされている．特にパッチアンテナ素子は設計や製作の容易さからよく利用され，報告例 [2]~[4] も多い．このような背景の中，我々は 60 GHz 帯小型無線通信端末用のフロントエンドモジュールアンテナとして，ダイポールアレイアンテナ [5], [6] や単素子パッチアンテナ [7] の検討を行ってきた．60 GHz 帯における大規模アレイアンテナをフェーズドアレイアンテナとして用いる場合の放射パターン測定において，直接 60 GHz 帯信号の位相ではなく，ミキサを用いて 1MHz の低い周波数で位相制御を行う測定法 [8] を検討している．その測定法の検証のため，まずは単素子アンテナを用いてアンテナの実装形態および測定手法がどの程度妥当であるか実験的に検証 [9] してきた．本稿では，上述の単素子パッチの場合を発展させ，アレイアンテナとした場合の 60 GHz 帯ビームフォーミングアンテナとしての利用可能性を評価するため，単素子パッチの場合と同様に，銅ボール接続実装技術を用いて，提案アンテナの 3 次元指向性測定を行った結果について報告する．

2. 提案アンテナの構造設計

素子アンテナとして，直交給電パッチアンテナ [9] を用いて，パッチアレイアンテナの設計を行った．今回は，基礎検討としてアレイ構成がなるべく小さい 2×2 アレイ構成とした．

銅ボールを用いたミリ波信号の基板間伝送技術の 60GHz 帯パッチアレイアンテナへの応用に関する研究

Application of the inter-substrate signal transmission technology using copper balls to 60-GHz-band patch array antenna

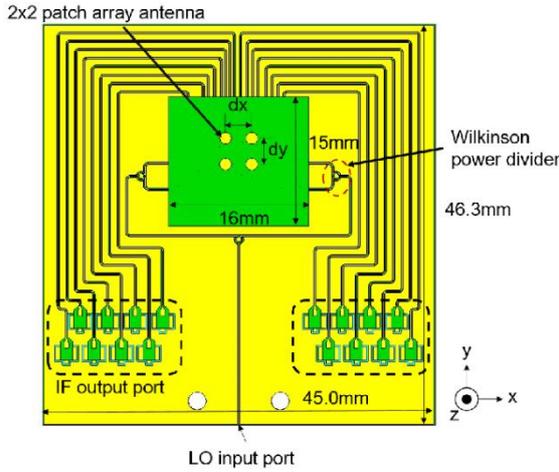


図 1：提案アンテナ構造の電磁界解析モデル

図 1 は設計したビームフォーミングアレイアンテナの全体像である。ビーム形成可能なエリアを評価するため、各素子アンテナの給電信号に対して位相差をつける必要がある。測定において、提案アンテナを受信アンテナとして動作させ、各素子アンテナから出力される信号の振幅と位相を測定し、位相差をつける操作は事後処理で MATLAB を使ってビームエリアを評価した。なお、60 GHz 信号の振幅と位相差をマルチチャネルで同時に測定することは難しいため、各素子アンテナ直下にはミキサチップを実装し、1 MHz の IF 信号に変換してオシロスコープにより測定を行う方法をとった。そのため、図 1 に示す提案アンテナは、2 枚の多層基板を積層実装した構造となっており、上基板がアンテナ基板、下基板がミキサの LO 信号や IF 信号の伝送線路基板となっている。下基板の大きさは 45.0mm × 46.5mm であり、上基板の大きさは 15.0mm × 16.0mm である。なお、下基板の IF 信号用コネクタは 16 箇所存在するが、より大規模のアレイにも共用できるようにしたためであり、本報告の 2 × 2 アレイでは、全 4 素子に 2 点給電されるため、全部で 8 個の IF 信号用コネクタを利用する。LO 信号は 1.85mm コネクタを利用したエンドランチ同軸コネクタから供給され、各ミキサにはウィルキンソンディバイダにより分配される。IF 信号のコネクタには、W.FL コネクタを利用している。基板間の伝送線路には、裏面グラウンドつきコプレーナ線路を利用している。

x 方向の素子間隔 dx および y 方向の素子間隔 dy はいずれも 3.0mm である。なお、基板材料は MEGTRON7 である。

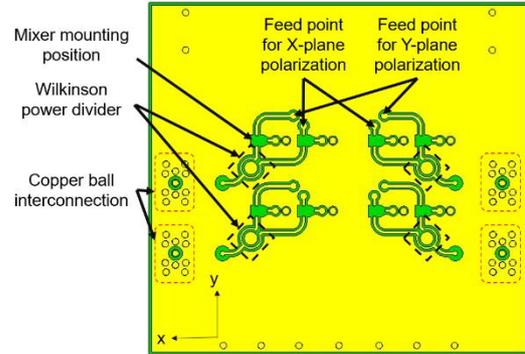


図 2：上部基板の裏面レイアウト

図 2 は、上基板であるアンテナ基板の裏面パターンである。アンテナ基板の裏面に GaAs ミキサチップがフリップチップボンディングにより搭載される。各給電点の直下にミキサチップが搭載されるため、ミキサ数は 8 個である。上下基板間の物理的な支持や、ミキサへの LO 信号伝送には図 3 に示す銅ボール接続技術 [10] を用いた。

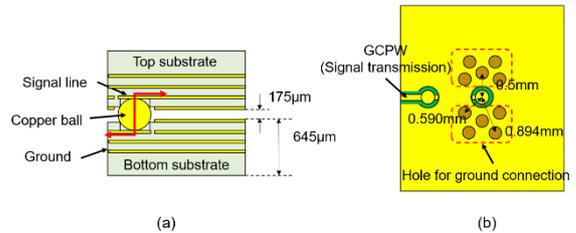


図 3：基板レイアウトの詳細：(a)断面構造と信号伝送経路のイメージ、(b)銅ボール搭載部の拡大図

銅ボールの直径は 350 μm であり、掘り込みの深さは 90 μm である。LO 信号伝送の銅ボール接続部分は、疑似同軸線路構造となっている。銅ボール搭載部分には、掘り込み構造を設けて銅ボール搭載実装の歩留まり改善を図っている。上下基板間隔は 175 μm であり、厚さ 100 μm の GaAs ミキサチップを基板間に挟み込める構造となっている。

3. 提案アンテナのビームフォーミング領域の解析

図 1 に示す構造を用いて、給電位相差を 45 度きざみ

銅ボールを用いたミリ波信号の基板間伝送技術の 60GHz 帯パッチアレイアンテナへの応用に関する研究

Application of the inter-substrate signal transmission technology using copper balls to 60-GHz-band patch array antenna

で変化させ、メインビーム方向を変化させる解析を行った。

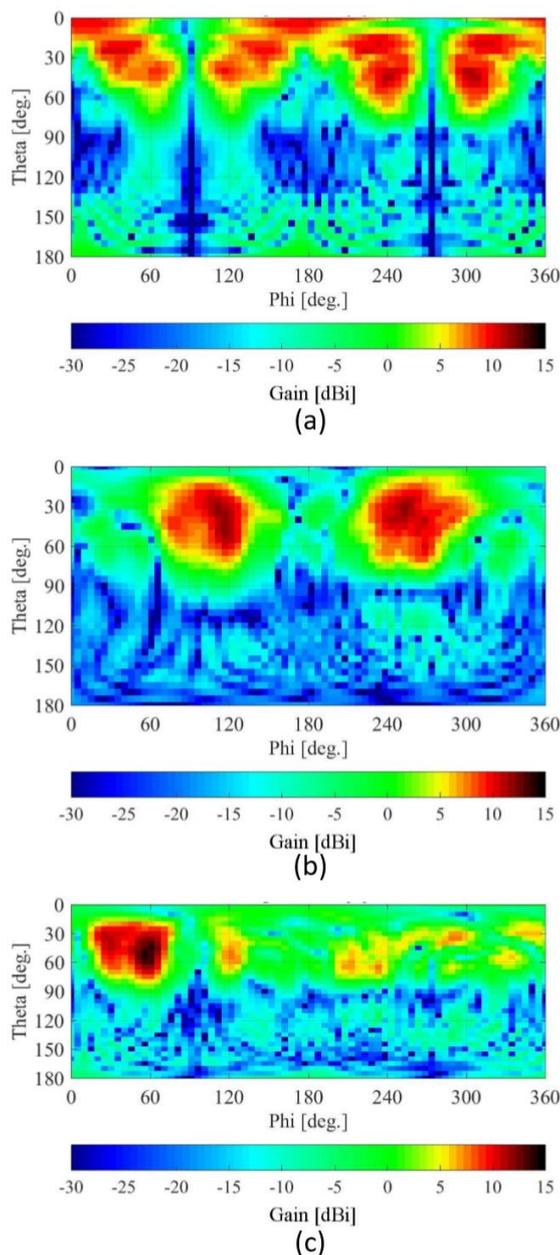


図4：60 GHzにおける3次元指向性パターンの解析結果:(a)xz面に主偏波を持つ場合,(b)yz面に主偏波を持つ場合,(c)2点給電を行った場合

図4は、60 GHzにおける3次元指向性パターンの解析結果である。素子アンテナが2点給電のため、それぞれの給電点を単独で利用した場合の解析結果が(a),(b)であり、(c)は2点給電を行った場合である。

給電位相差は、(a)の場合 $x = 0^\circ$, $y = 180^\circ$, (b)の場合 $x = 270^\circ$, $y = 180^\circ$, であり、(c)の場合、さらにそれぞれの給電点間の給電位相差 $\alpha\beta\gamma$ を考慮し、 270° とした場合の解析結果である。紙面の都合上、3種類のみ掲載となっているが、全ての位相差は45度きざみで解析を行っており、利得が10 dBi以上となる領域を評価した。

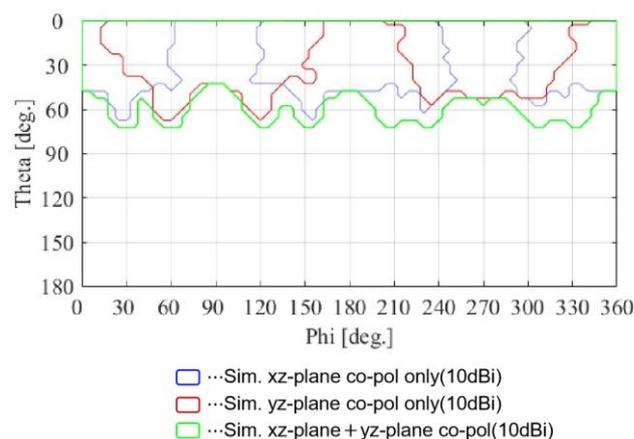


図5：60 GHzにおける利得が10 dBi以上となるエリアの解析結果

図5は、60 GHzにおける利得が10 dBi以上となる領域の解析結果である。xz面に主偏波を持つ場合と、yz面に主偏波を持つ場合、2点給電を行った場合を重ねて示している。2点給電を行うことにより、 ϕ 方向において360度にわたり10 dBi以上の利得が得られることがわかった。

4. 提案アンテナの試作と測定

測定による評価を行うため、提案アンテナの試作を行った。

銅ボールを用いたミリ波信号の基板間伝送技術の 60GHz 帯パッチアレイアンテナへの応用に関する研究

Application of the inter-substrate signal transmission technology using copper balls to 60-GHz-band patch array antenna

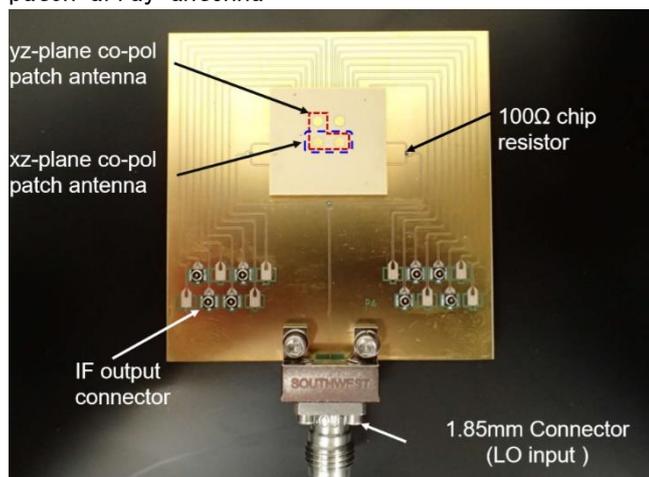
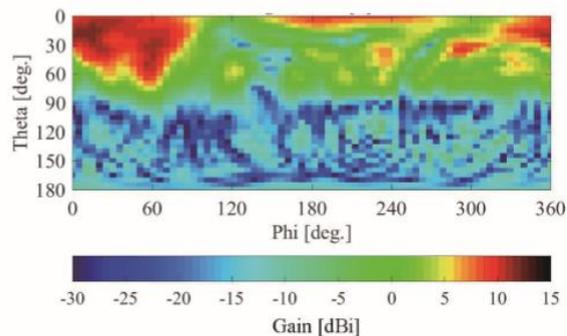
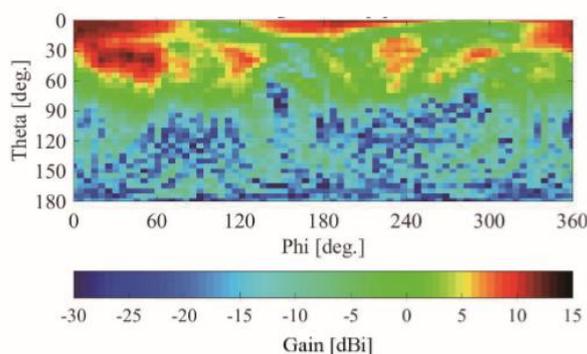


図 6 : 試作アンテナの写真

図 6 は、試作した 60 GHz 帯 2×2 ビームフォーミングアレイアンテナである。基板材料 MEGTRON7 を用いて、多層基板を製作した。その後、上基板のアンテナ基板裏面に GaAs ミキサのフリップチップ実装を行った。最後に銅ボールを用いて上基板と下基板を接続した。IF 信号出力端子コネクタは、必要な箇所のみ実装している。LO 信号の供給には、1.85mm のエンドランチコネクタを用いた。60 GHz 帯ビームフォーミングアンテナの給電位相差を変化させた場合の 3 次元放射パターンを得るため、エレメントパターンの測定と位相差をつける操作の 2 段階に分けて行った。エレメントパターンの測定には、既に開発済みの測定系[8] を用いた。位相差をつける操作は、MATLAB を用いて計算し、MATLAB 上で 3 次元放射パターンを表示させ、利得が 10 dBi 以上となる領域まで表示させた。



(a)



(b)

図 7 : 3 次元放射パターンの解析結果と測定結果の比較 : (a)解析結果,(b) 測定結果

図 7 は、給電位相差が xz 面に主偏波を持つアレイの給電位相差が $x = 0^\circ$, $y = 180^\circ$, yz 面に主偏波を持つアレイの給電位相差が $x = 270^\circ$, $y = 180^\circ$, アレイ間の給電位相差が $xx = 270^\circ$, $yy = 0^\circ$ となる場合の 3 次元放射パターンの解析結果と測定結果の比較である。細かな部分は異なるものの、メインビーム方向などおよそ傾向は一致しているといえる。その他給電位相差でも解析結果との比較・確認を行なった結果、測定結果に致命的な問題はないことを確認した。なお、都合により、1 台のみの試作となったため、実装歩留まりの制約もあり、全 8ch 中 5ch のみの信号出力が得られた。したがって、当初解析した結果との比較は条件が異なるため、信号出力がなかった給電点の素子パターンを 0 にして、再解析を行った結果を図に示している。

銅ボールを用いたミリ波信号の基板間伝送技術の 60GHz 帯パッチアレイアンテナへの応用に関する研究

Application of the inter-substrate signal transmission technology using copper balls to 60-GHz-band patch array antenna

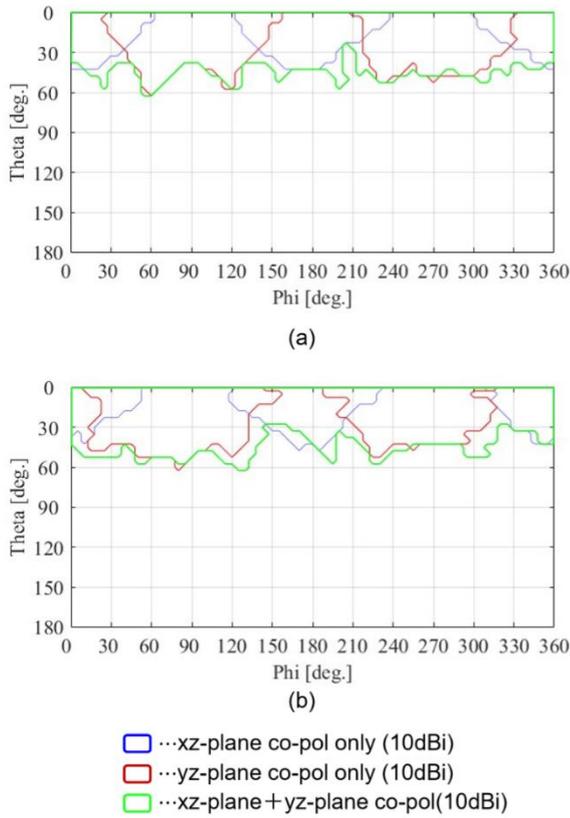


図 8 : 60 GHz における利得が 10 dBi 以上となるエリアの解析結果と測定結果の比較 (5 箇所の給電点を用いた場合)

図 8 は、利得が 10 dBi 以上となる領域の測定結果である。解析結果と測定結果を比較すると、傾向は一致しており、提案アンテナ構造の有効性を検証することができた。

5. まとめ

本稿では、60 GHz 帯におけるビームフォーミングアンテナの実現を大きな目的とし、直交 2 点給電パッチアンテナ素子を用いた銅ボール接続実装技術および 3 次元指向性測定技術の検証実験を行った結果について報告した。アレイ構成は 2×2 とし、素子間隔は 60 GHz における 0.6 波長、3.0mm とした。電磁界シミュレーションにより、給電位相差を 45 度きざみで変化させた場合の利得が 10 dBi 以上となる領域を評価し、ビームフォーミングアンテナとしての動作を確認

した。さらに、銅ボール接続実装技術を用いて、2 枚の多層基板を積層実装し、電磁界シミュレーションと同様の評価を測定でも行った。その結果、全 8 個の端子から信号が出力される場所、5 個の端子のみから信号が出力され、その結果を用いて放射パターンを得た上で、利得が 10 dBi 以上となる領域を評価した。測定結果は解析結果と同様の傾向が得られ、提案アンテナ構造の有効性を確認するとともに、今後大規模アレイアンテナへの発展に向けて、多くの知見が得られた。

6. 謝辞

近年の花形分野とされる AI や IoT システム、アプリの研究開発領域とは異なり、本研究は、通信関係のハードウェアに関する基礎研究をテーマにしています。通信系のハードウェア関連分野の研究開発は、予算獲得がまず増す厳しさを増してきている中で、私の研究提案を採択していただいた SCAT 研究助成に感謝を申し上げます。本稿で報告した内容以外にも、多くの知見が得られておりますが、それらの内容は今後学術論文誌等で報告することで、社会還元とさせていただきます。

参考文献

- [1] S. Lin, K. B. Ng, H. Wong, K. M. Luk, S. S. Wong, and A. S. Y. Poon, "A 60GHz digitally controlled RF beamforming array in 65nm CMOS with off-chip antennas," Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, June 2011.
- [2] M. Fakharzadeh, M.-R. Nezhad-Ahmadi, B. Biglarbegan, J. Ahmadi-Shokouh, and S. Safavi-Naeini, "CMOS phased array transceiver technology for 60 GHz wireless application," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 4, pp. 1093-1104, Jan. 2010.
- [3] C.-H. Tseng, C.-J. Chen, and T.-H. Chu, "A low-cost 60-GHz switched-beam patch antenna array with butler matrix network," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters vol. 7, pp. 432-435, July 2008.

銅ボールを用いたミリ波信号の基板間伝送技術の 60GHz 帯パッチアレイアンテナへの応用に関する研究

Application of the inter-substrate signal transmission technology using copper balls to 60-GHz-band patch array antenna

[4] Z. Ahmad, J. Hesselbarth, "Dual-polarized antenna with orthomode transducer for 60 GHz communications," European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), April 2016.

[5] Y. Suzuki, S. Yoshida, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "60 GHz band 2×4 dipole array antenna using multi stacked organic substrates structure," in Proc. Int. Symp. on Antennas and Propag., Oct. 2012.

[6] S. Yoshida, Y. Suzuki, T. T. Ta, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "A 60-GHz band planar dipole array antenna using 3-D SiP structure in small wireless terminals for beamforming applications," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 7, pp. 3502-3510, July 2013.

[7] 鬼丸隆太郎, 吉田賢史, 西川健二郎, "多層構造を用いた 60GHz 帯ビームフォーミング用パッチアンテナの検討," 信学総大, B-1-57, March 2018.

[8] T. T. Ta, S. Yoshida, Y. Suzuki, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "A 3-D radiation pattern measurement method for a 60-GHz-band

WPAN phased array antenna," in Proc. Asia-Pacific Microwave Conf., Dec. 2012.

[9] 吉田賢史, 鬼丸隆太郎, 西川健二郎, "60 GHz 帯単素子パッチアンテナを用いた銅ボール接続実装技術および 3 次元指向性測定技術の検証実験," 信学総大, C-2-55, March 2019.

[10] S. Yoshida, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "60-GHz band copper ball vertical interconnection for MMW 3-D system-in-package front-end modules," IEICE Trans. Electron., vol. E95-C, no. 7, pp. 1276-1284, July 2012.

この研究は、平成 27 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 28 ~ 平成 30 年度に実施されたものです。