

6Gに向けた300 GHz帯テラヘルツ無線通信によるリアルタイム動画伝送

300 GHz Band Real-Time Wireless Video Transmission for 6G

森下 陽平
Yohei Morishita
浅野 仁
Hitoshi Asano

寺岡 俊浩
Toshihiro Teraoka
坂本 剛憲
Takenori Sakamoto

檜野 祐一
Yuichi Kashino
白方 亨宗
Naganori Shirakata

要 旨

第6世代移動通信システム（6G）におけるテラヘルツ帯の活用を促すことを狙いとして、工場のマシンビジョンやテレビ局のスタジオなどでの使用を想定した300 GHz帯リアルタイム動画伝送システムを開発した。本システムでは直交周波数分割多重（OFDM）信号に対応するためにセルフヘテロダイン方式の送受信アーキテクチャを300 GHz帯に適用し、通信距離の長距離化のために高利得のカセグレンアンテナを新たに開発した。通信距離10 mにおいて、300 GHz帯では業界初となるOFDMを用いたリアルタイム動画無線伝送を実現した。

Abstract

A 300 GHz band real-time video transfer system, which is intended for use in machine vision for factory automation, TV studios, etc., has been developed with the aim of utilizing the terahertz band in a sixth generation mobile communication system (6G). In this system, a self-heterodyne architecture is applied to the 300 GHz band system for supporting the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) signal, and a high gain Cassegrain antenna was newly developed to extend communication distance. We demonstrated industry-first 300 GHz band real-time video transfer with an OFDM signal at a 10 m communication distance.

1. はじめに

2020年に第5世代移動通信システム（5G）がサービスインした。5Gでは、高速大容量の無線通信を実現するために、6 GHz以下の周波数に加えて28 GHz/39 GHz/41 GHz帯といったミリ波帯が利用されている。シャノン・ハートレーの理論では通信路容量は帯域幅に比例し、高い周波数であれば高速通信を実現するために必要な広帯域の周波数帯を確保しやすいからである。5Gの実用化を受けて研究開発の中心はさらなる高速通信を実現する第6世代移動通信システム（6G）に移っているが、6Gでは新たに100 GHz～300 GHzのテラヘルツ帯の利用が検討されている[1]。

300 GHz帯が期待される理由は大きく2つあり、1つは、周波数割り当てである。世界無線通信会議（WRC2019）において、275 GHz～296 GHz、306 GHz～313 GHz、318 GHz～333 GHz、356 GHz～450 GHzが移動・固定無線サービスの周波数帯として特定された[2]。もう1つの理由は、大気中の酸素分子や水蒸気が電波を吸収することにより起こる大気減衰である。これが10 dB/km以下となる広い電波の窓が200 GHz～300 GHzにかけて存在しており、300 GHz帯は比較的減衰の小さい周波数と考えられている[3]。

300 GHz帯のデバイスの研究開発も盛んに行われており、フォトニクスベースの検討や化合物半導体を用いた検討が発表されている[4]-[6]。300 GHz帯システムの商用化に際しては、量産性が重要となるが、当社を含む研究グループは

CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）プロセスで300 GHz帯のトランシーバを実現している[3][7][8]。CMOSプロセスはパソコンのプロセッサやメモリといった民生品の製造に広く使用されているものであり、小型、低コストの300 GHz帯無線システム実現の期待が高まっている。

一方で、300 GHz帯CMOSトランシーバを6Gで想定される実用的なアプリケーションへ適用する検討はまだ不十分であり、想定される通信方式への対応や通信距離の長距離化が必要である。

本稿では、まず300 GHz帯無線通信システムの課題を説明する。続いて、それらの課題を克服する技術を説明し、その応用例として開発した6G向け300 GHz帯無線通信システムの設計内容とその実験結果を紹介する[9]。

2. 300 GHz帯無線通信システムの課題

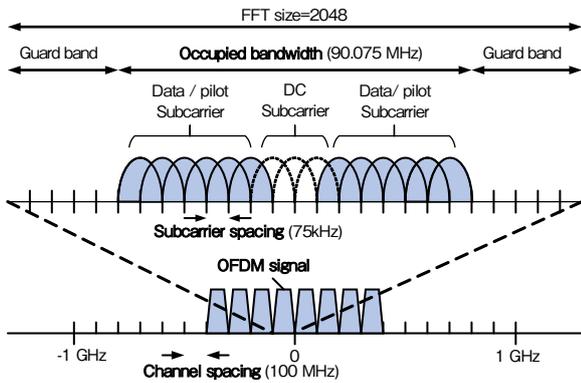
本章では、想定される通信方式や通信距離に対応した300 GHz帯無線通信システムを実現するうえでの課題を述べる。

2.1 位相雑音による通信品質の劣化

無線通信システムには、位相雑音と呼ばれる位相揺らぎがある。300 GHzの信号は、低い周波数を逡倍して生成するが、生成された高周波信号の位相雑音は逡倍数に比例する。6 GHzを50逡倍して300 GHzを生成した場合、その位相

雑音は6 GHzよりも34 dB増加してしまう。

5G（標準化プロジェクト3GPPの「Release 15」仕様）では、ミリ波帯も含めて直交周波数分割多重（OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing）方式が採用されている[10]。周波数特性をもつ広帯域システムでも安定した通信ができ、かつベースバンドは周波数帯によらず共通の回路で処理できるため300 GHz帯でもOFDMを採用することが考えられる。第1図に5GベースのOFDM信号の例を示す^(注1)。OFDM信号は狭帯域の直交したサブキャリアを重ねてなる構成となっているが、位相雑音が大きいと近接するサブキャリア間の直交性が崩れ、サブキャリア間干渉が起り通信品質を劣化させてしまう。6Gの300 GHz帯でOFDMを採用するためには、低位相雑音なトランシーバが必要となる。



第1図 5GベースのOFDM信号の仕様
Fig. 1 Specification of 5G-based OFDM signal

2.2 自由空間伝搬損の増大

電波の窓といえども、携帯電話で主に使われている6 GHz以下の周波数に比べると伝搬時の減衰は大きい。これは自由空間伝搬損と呼ばれる損失があるためである。(1)式に距離と電波強度の関係を表すフリスの伝達公式を示す[11]。

$$P_R = G_T G_R \frac{1}{L_p} P_T \dots \dots \dots (1)$$

P_R ：受信電力, P_T ：送信電力,
 G_T ：送信アンテナ利得, G_R ：受信アンテナ利得,
 L_p ：自由空間伝搬損

ここで、自由空間伝搬損は(2)式で表される。

$$L_p = \left(\frac{4\pi Df}{c}\right)^2 \dots \dots \dots (2)$$

c ：光速, D ：距離, f ：周波数

自由空間伝搬損は、周波数の2乗に比例するため高い周波数ほど増加する。例えば距離10 mの300 GHzにおける自由空間伝搬損は100 dBを超えてしまう。

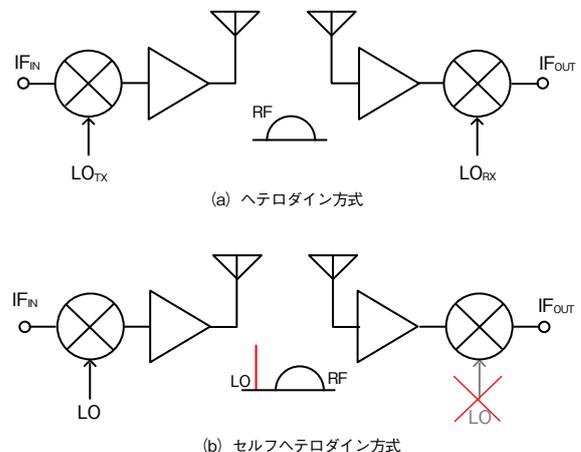
また、CMOSプロセスの微細化に伴って向上してきた最大発振周波数 f_{max} も先端のプロセスではゲート抵抗の影響が大きく飽和傾向にあり、300 GHz帯でCMOSの増幅器を設計することは困難である。したがって、CMOSトランシーバを用いる場合は、送信電力を大きくすることが難しい。300 GHz帯で通信距離を延ばすためには、自由空間伝搬損を補う工夫が必要となる。

3. 300 GHz帯の課題を克服する工夫

本章では、前述の課題を克服するための技術的工夫を説明する。位相雑音を低減するために、セルフヘテロダイン方式の300 GHz帯トランシーバを設計し、自由空間伝搬損を補うための工夫としてカセグレンアンテナを設計する。

3.1 セルフヘテロダイン方式による位相雑音の低減

300 GHz帯において、位相雑音を低減することは困難である。そこで、アーキテクチャの工夫により位相雑音を低減する手法として、セルフヘテロダイン方式を検討した[13]。第2図(a)に示すヘテロダイン方式では、送信側と受信側でそれぞれ局部発振（LO: Local Oscillator）信号を生成するのに対して、第2図(b)のセルフヘテロダイン方式では、送信機から無線周波数（RF: Radio Frequency）信号だけでなく、LO信号を送信し、受信機は受信したLO信号によってRF信号のダウンコンバートを行う。送受で同じLO

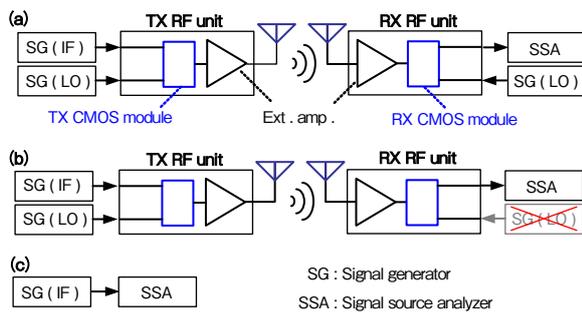


第2図 送信/受信アーキテクチャの比較
Fig. 2 Transmitter / Receiver architecture comparison

(注1) 本稿に記載の無線通信システムは3GPPのRelease15策定前に開発が進められたため、実験に使用したOFDM信号はVerizon 5G[12]に基づいている。

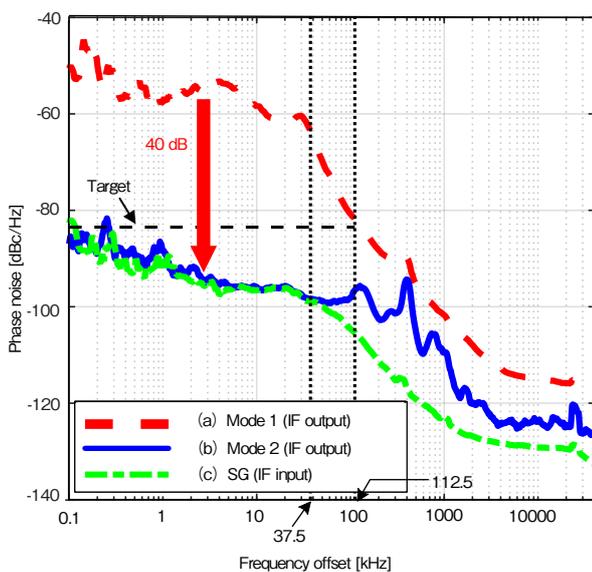
信号を使うので、LO信号の位相の揺らぎがキャンセルされ、ダウンコンバートされた信号の位相雑音が低減される。

セルフヘテロダイン方式による位相雑音の低減効果を確認するために、第3図に示す3つの構成で位相雑音の比較を行った。第3図(a)はヘテロダイン方式 (Mode1) での受信機出力信号の位相雑音、第3図(b)はセルフヘテロダイン方式 (Mode2) での受信機出力信号の位相雑音、第3図(c)は入力の中間周波数 (IF: Intermediate Frequency) 信号の位相雑音を測定した。



第3図 位相雑音の測定系
Fig. 3 Setup of phase noise measurement

第4図に測定結果を示す。サブキャリア帯域を超える位相雑音は隣接サブキャリアに漏れこむため、受信したいサブキャリア帯域 (~ 37.5 kHz) に隣接サブキャリアからの漏洩 (ろうえい) 分 (37.5 kHz \sim 112.5 kHz) を加えた112.5 kHzまでの積分位相雑音による信号対雑音比の劣化が十分小さくなるように目標値 (第4図のTarget) を -83.5 dBc/Hzとした



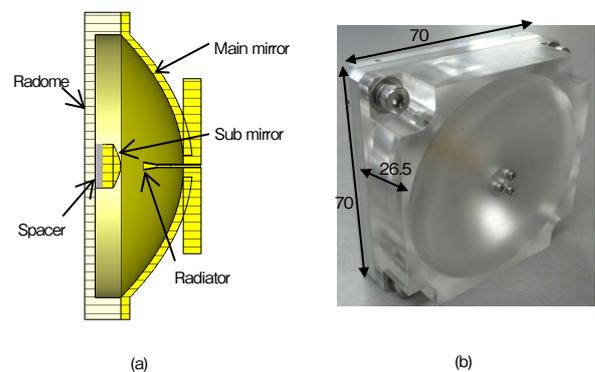
第4図 位相雑音の測定結果
Fig. 4 Measured phase noise

[14]. (b) と (c) の位相雑音レベルは50 kHz未満においておおよそ一致しており、セルフヘテロダイン方式ではLOの影響がキャンセルされていることがわかる。(a) と (b) を比較すると、セルフヘテロダイン方式では、ヘテロダイン方式に比べ約40 dB位相雑音を低下できている。50 kHz以上において (b) の位相雑音レベルが (c) に比べて増加しているのは、RX RFユニットの雑音による。

3.2 高利得カセグレンアンテナの設計

(1) 式は、受信電力が送信と受信のアンテナ利得に比例することも示している。そこで、通信距離を延ばすために高利得のアンテナを新たに開発した。アンテナの構成としては、高アンテナ利得かつCMOS無線通信モジュールと導波管変換器を介して最短経路で接続可能なカセグレンアンテナを選択した。無線通信距離を10 mとした場合のリンクバジェットからアンテナ利得の目標は39 dBiとした。

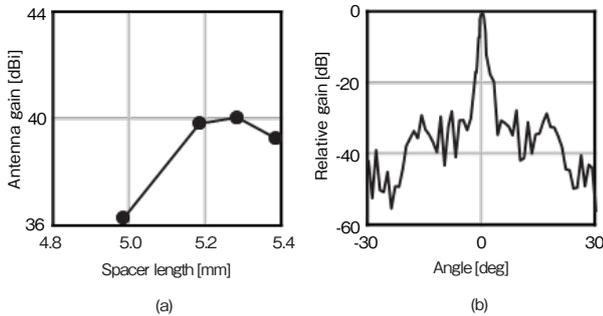
第5図(a)にカセグレンアンテナの構造を示す。放射器、副反射鏡、主反射鏡で構成されており、目標利得39 dBiを得るため主反射鏡の直径は60 mmに設定した。300 GHz帯は波長が短いため、製造誤差の影響が大きい。製造誤差を補償するため、アンテナ利得に対する製造誤差の影響が大きい1次放射器と副反射鏡の距離をスペーサで調整できる構成とした。第5図(b)に作製したカセグレンアンテナの写真を示す。アンテナ前面にはシクロオレフィンポリマー (COP) を用いたレドームを付けており、副反射鏡はレドームで支える構成とした。アンテナの面積は使用する電波の波長に依存し周波数が高いほど小型にできるため、サイズは、70 mm \times 70 mm \times 26.5 mmと小型である。



第5図 設計したカセグレンアンテナ
Fig. 5 Designed Cassegrain antenna

第6図にカセグレンアンテナの測定結果を示す。第6図(a)はスペーサの厚さに対する300 GHzでのアンテナ利得を示し、第6図(b)に放射パターン (E面) を示す。スペーサ

の調整による1次放射器と副反射鏡の距離の調整によって、300 GHzにおいて39 dBi以上のアンテナ利得を実現した。



第6図 カセグレンアンテナの測定結果
Fig. 6 Measured results of the Cassegrain antenna

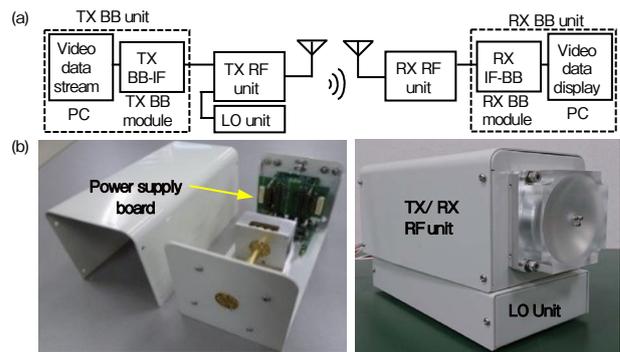
4. 300 GHz帯リアルタイム動画伝送システム

本章では、前章で説明した技術を用いて実現した300 GHz帯リアルタイム無線通信システムを説明する。

近年、非接触や遠隔といったものの需要が高まっており、工場のマシンビジョンやテレビ局のスタジオ等では、低遅延の高精細動画伝送が求められている。これらは製造の現場、映像制作に大きな変化をもたらす可能性がある。そこで、6Gの高速かつ低遅延なシステムのPoC (Proof-of-Concept) として、これらに利用可能なリアルタイム動画伝送を300 GHz帯の無線通信で行う。小型筐体内に無線通信に必要な機能を収め、5GベースのOFDM信号を用いて、伝送距離10 mの安定した通信を300 GHz帯CMOSトランシーバで実現する。

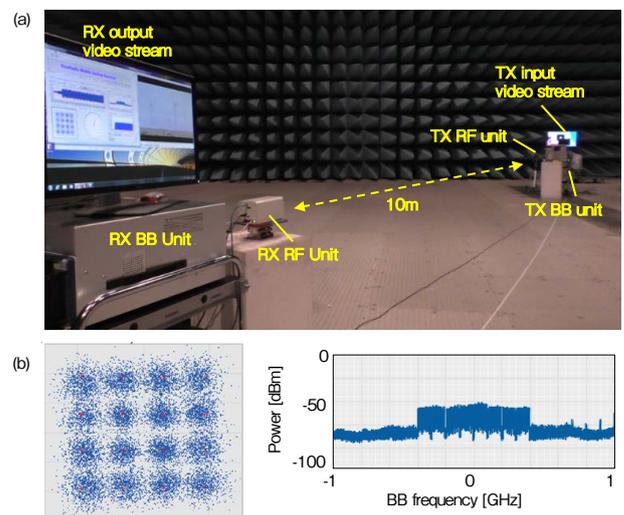
第7図 (a) に300 GHz帯リアルタイム無線動画伝送の実験系のブロック図を示す。送信 (TX) CMOS無線モジュールは文献[7]、受信 (RX) CMOS無線モジュールは文献[8]のものを言い、PCとベースバンド (BB) モジュールはPCI Expressによって接続した。TX BBユニットは、第1図に示すOFDM信号を10.5 GHzのIF周波数にて生成する。この信号はTX RFユニットによって、293.7 GHzにアップコンバートされ、283.2 GHzのLO信号とともに送信のカセグレンアンテナから空間に放射される。受信のカセグレンアンテナは空間からRF信号とLO信号をRX RFユニットに受信する。RX RFユニットは、RF信号を10.5 GHzのIF信号にダウンコンバートし、RX BBユニットはIF信号からビデオ信号を復調してディスプレイに表示する。

第7図 (b) に設計した300 GHz帯無線通信機の写真を示す。RFユニットとLOユニットからなる無線通信機のサイズは15 cm × 20 cm × 10 cmとなっている。



第7図 300 GHz帯リアルタイム動画伝送システム
Fig. 7 300 GHz band real-time video transmission system

第8図 (a) に通信距離10 mでの無線伝送実験系と出力画面の写真を示す。送信側のPCから動画を300 GHz帯の無線電波に乗せて送信し、RX BBユニットに接続されたディスプレイ上に表示する。第8図 (b) にコンスタレーションと周波数スペクトラムを示す。第1図で説明した矩形のOFDM信号波形が観測されており、測定されたEVM (Error Vector Magnitude) は距離10 mにおいて13.7 %であった。ここで、コンスタレーションとは、伝送されるデータの振幅と位相を極座標で表した図であり、EVMとは、理想的な信号と測定された信号間のベクトルの差である。



第8図 リアルタイム動画伝送の実験結果
Fig. 8 Measured results of real-time video transmission

筆者らの開発した無線通信システムの性能と、化合物半導体を用いて300 GHz帯の無線通信を実現した例[5][6]との性能比較を第1表に示す。化合物半導体を用いた無線通信では60 Gbps以上の通信速度を達成しているが、通信距離は10 m未満であり、シングルキャリアの通信である。一方、

本検討では業界で初めて300 GHz帯において、CMOSの無線通信モジュールを用いた距離10 mの5GベースのOFDM信号によるリアルタイム無線動画伝送を実現した。なお、1.68 Gbpsは実験に使用した動画の伝送には十分な通信速度である。伝送できる動画の解像度はBBユニットにより律速されており、BBユニットの処理速度を向上することでさらなる改善も期待できる。

第1表 性能比較

Table 1 Performance comparison

	Tech. (IC)	Freq. [GHz]	Ant. Gain / distance [dBi]/[m]	Data rates [Gbps]	Real-time transfer	Mod.
This work	40 nm CMOS	293.7	39/10	1.68	Yes	OFDM (16QAM)
[5]	35 nm GaAs mHEMT	300	24/1	64	No	Single carrier (QPSK)
[6]	80 nm InP HEMT	287	50/2.2	100	No	Single carrier (16QAM)

5. まとめ

300 GHz帯無線通信システムの課題とそれを克服するための技術に関して述べた。300 GHz帯システムの高い位相雑音はセルフヘテロダイナーキテクチャによって低減可能であり、300 GHz帯においてもOFDMを使用できることを示した。300 GHz帯の大きな自由空間伝搬損は高いアンテナ利得をもつカセグレンアンテナを小型に実現することで補償できることを示した。さらにこれらの技術の応用例として、工場やテレビ局のスタジオを想定した10 mのリアルタイム動画伝送を5GベースのOFDM信号を用いて300 GHz帯において達成した。

6Gの300 GHz帯無線通信は、Society 5.0においてサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムを支える基盤になると期待される。本技術をさらに発展させ、低コストで実用性の高い300 GHz帯無線通信機の実現を目指す。

本技術の一部は、総務省の委託を受けて実施した「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発 - 300 GHz帯シリコン半導体CMOSトランシーバ技術 -」(JPJ000254)による成果である。本研究の実施に協力いただいた広島大学、国立研究開発法人情報通信研究機構の関係各位に深謝する。

参考文献

- [1] NTT ドコモ, “ホワイトペーパー 5Gの高度化と6G,” https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperJP_20211108.pdf, 参照 Apr. 22, 2022.
- [2] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, “Provisional final acts,” World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19), p. 60, Nov. 2019.
- [3] 藤島実, “CMOS集積回路を用いたテラヘルツ広帯域通信とその応用,” 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, no. 47号, pp. 190-196, Dec. 2018.
- [4] T. Nagatsuma et al., “Real-time 100-Gbit/s QPSK transmission using photonics-based 300-GHz-band wireless link,” IEEE Topical Meeting on Microw. Photonics, pp. 27-30, Nov. 2016.
- [5] I. Kallfass et al., “Towards MMIC-based 300 GHz indoor wireless communication systems,” IEICE Trans. Electron., vol. E98-C, no. 12, pp. 1081-1090, Dec. 2015.
- [6] H. Hamada et al., “300-GHz, 100-Gb/s InP-HEMT wireless transceiver using a 300-GHz fundamental mixer,” IEEE MTT-S Int. Microw. Symp., pp. 1480-1483, June 2018.
- [7] 高野恭弥 他, “テラヘルツ通信を実現する300 GHz帯CMOS送信機モジュール,” 電子情報通信学会論文誌C, vol. J102-C, no. 12, pp. 348-355, Dec. 2019.
- [8] S. Hara et al., “300-GHz CMOS receiver module with WR-3.4 waveguide interface,” Eur. Microw. Conf., pp. 396-399, Sep. 2018.
- [9] Y. Morishita et al., “300-GHz-Band self-heterodyne wireless system for real-time video transmission toward 6G,” IEEE Int. Symp. on Radio-Frequency Integrated Technology, pp. 151-153, Sep. 2020.
- [10] 佐野洋介 他, “5GにおけるRF性能/無線リソース制御仕様,” NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル, vol. 26, no. 3, pp. 74-88, Nov. 2018.
- [11] 唐沢好男, “フリスの伝達公式への温故知新,” 電子情報通信学会 信学技報, vol. 115, pp. 33-36, Jan. 2016.
- [12] T. Eichler et al., “The 5G Technology Ecosystem,” https://cdn.rohde-schwarz.com/kr/downloads_31/seminar_materials/Session3_-_5G_Seminar_Korea_5G_Technology_Ecosystem_v4_161107.pdf, p 16, 参照 Apr. 22, 2022.
- [13] Y. Shoji et al., “Millimeter-wave remote self-heterodyne system for extremely stable and low-cost broad-band signal transmission,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 50, no. 6, pp. 1458-1468, June 2002.
- [14] タンザカン, “周波数領域信号処理による局部発振器位相雑音補償技術,” <https://shingi.jst.go.jp/pdf/2014/info05.pdf>, 参照 Apr. 22, 2022.

執筆者紹介



森下 陽平 Yohei Morishita
パナソニック インダストリー (株) 技術本部
Engineering Div., Panasonic Industry Co.,Ltd
博士 (工学)



寺岡 俊浩 Toshihiro Teraoka
パナソニック オートモーティブシステムズ (株)
インフォテインメントシステムズ事業部
Infotainment Systems Business Div., Panasonic
Automotive Systems Co., Ltd.



榎野 祐一 Yuichi Kashino
(株) パナソニック システムネットワークス開
発研究所 技術センター
Technology Center, Panasonic System Networks R&D
Lab. Co., Ltd.



浅野 仁 Hitoshi Asano
(株) パナソニック システムネットワークス開
発研究所 技術センター
Technology Center, Panasonic System Networks R&D
Lab. Co., Ltd.



坂本 剛憲 Takenori Sakamoto
パナソニック インダストリー (株) 技術本部
Engineering Div., Panasonic Industry Co.,Ltd



白方 亨宗 Naganori Shirakata
パナソニック インダストリー (株) 技術本部
Engineering Div., Panasonic Industry Co.,Ltd