

300GHz 帯無線通信と超高周波 CMOS 集積回路の基礎 Fundamentals of 300 GHz Wireless Communications and Ultrahigh Frequency CMOS Integrated Circuits

藤島 実

Minoru Fujishima

広島大学大学院先進理工系科学研究科

概要

44GHz の連続した周波数帯域を利用可能な 300GHz 帯は、これまでの無線通信と比べて圧倒的に高い伝送レートを実現できる可能性を秘めている。本講演では、この 300GHz 帯通信とそれを実現する CMOS 集積回路の概要を説明する。

Abstract

The 300 GHz band, which is available in the continuous frequency band of 44 GHz, is a better alternative to previous wireless communications. It has the potential to achieve a dramatically high transmission rate. In this presentation, I will give an outline of the 300 GHz band communication and the CMOS integrated circuit to realize it.

1. はじめに

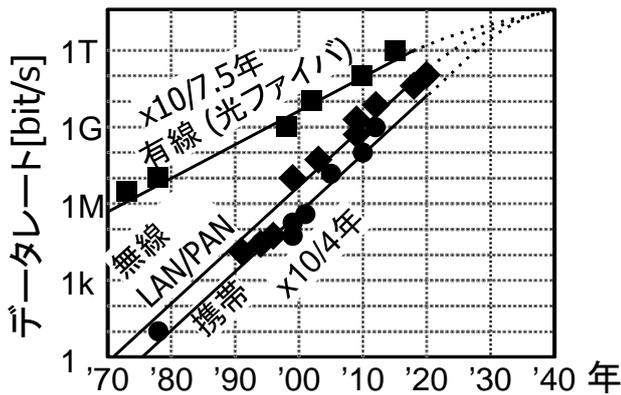


図1 有線通信と無線通信のデータレートの推移[1]

有線通信と無線通信のデータレートは年々上昇している (図 1)。特に無線通信のデータレートの上昇が著しく、これまでに無線通信の最大データレートが 100Gb/s を超えることが発表されている[2]。このままデータレートが上昇していけば、無線通信のデータレートが有線通信に比べて劣る時代はすぐに終わるだろう。無線通信のデータレートが急上昇している理由の一つに、より高いキャリア周波数を使用し、使用する周波数帯の拡大がある。これまででも、より高い周波数の開発によってデータレートは向上してきた。しかし、周波数帯域の拡大は、ベースバンドの周波数帯域の拡大にもつながる (図 2)。最終的には、ベースバンドのデータレートは有線のデータレートと同じになり、ベースバンドのデータレートは有線のデータレートと同じになる。

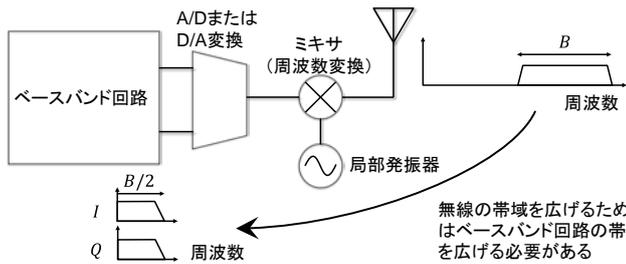


図2 無線通信のデータレートの向上は、より高い搬送波を使用し、電波の周波数帯域を増加させることによって達成されてきた。しかし、周波数帯域の増加は同時にベースバンドの帯域幅を増加させることになり、これは結局のところ有線通信と同様の技術的な制限となる。

広い周波数帯域を利用するのに適していると考えられるのが1テラヘルツ(THz)を中心とするテラヘルツと呼ばれる周波数帯域である。このテラヘルツの中で低周波数域となる 300GHz 帯が次世代無線通信

用周波数帯域として注目されている(図 3)。図 4 に 300GHz 近辺の周波数割り当てを示す。252GHz から 275GHz はこれまで陸上移動業務と固定業務の無線通信に割り当てられていた。275GHz 以上はこれまで周波数割り当てがなされていなかったが、WRC2019にて275GHzから296GHzが無線通信用途として特定された[3]。これらを合わせることで44GHzの周波数帯域が無線通信に利用できる。

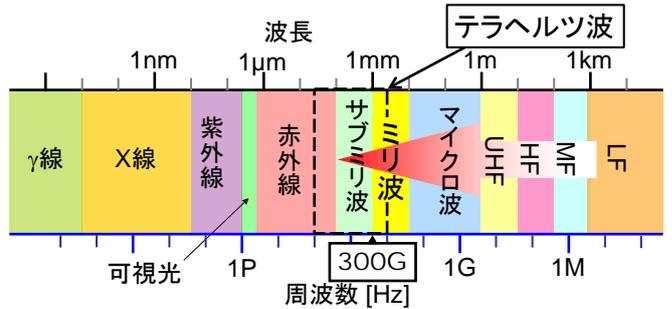


図3 波長と周波数による電磁波の分類。テラヘルツは光と電波の間に位置する 1THz(テラヘルツ)前後の周波数帯である。

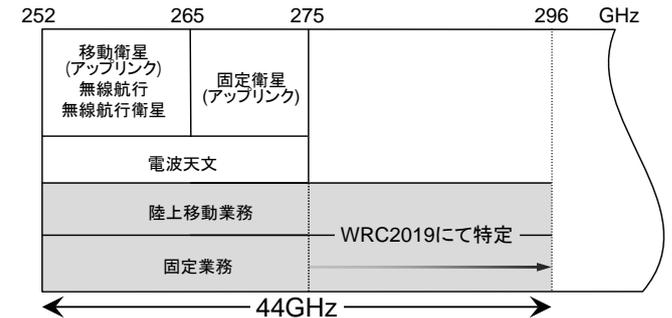


図4 300GHz 近辺の電波の割り当て状況。252GHz から 275GHz は陸上移動業務と固定業務の無線通信用に割り当てられている。WRC2019において275GHzから296GHzが無線通信用途として特定された。これらを合わせると44GHzの周波数帯域が無線通信に利用できるようになる。

300GHz 帯に対して IEEE 802.15.3d では 252.72GHz から 321.84GHz までのチャンネル割り当てが提案された[4](図 5)。60GHz 帯と同様チャンネルあたり 2.16GHz の周波数帯域を割り当てると 32チャンネルを割り当てることができる。ただし、296GHz 以上の周波数帯域では一部通信用途として特定されていない周波数帯域を含んでいる。我々は、この中のチャンネル 66 の周波数帯域を用いる CMOS トランシーバを世界で初めて実現した。次の章ではこのトランシーバについて解説する。そして、CMOS トランシーバを含む 300GHz 帯通信の未来について考察してみたい。

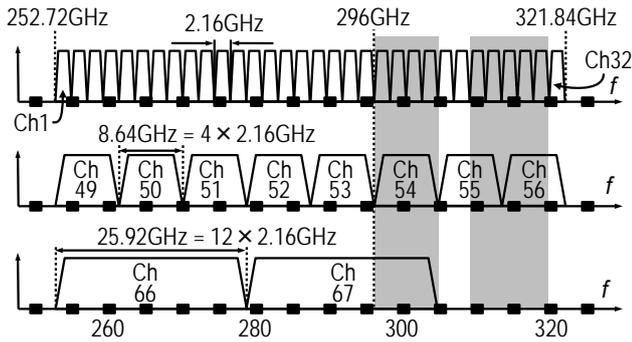


図 5 252.72GHz から 321.84GHz までの周波数帯域に対するチャンネル割り当てが IEEE 802.15.3d により提案された。ただし、296GHz 以上の周波数帯域は一部通信用途として特定されていない。

2. 300GHz 帯 CMOS ワンチップトランシーバ

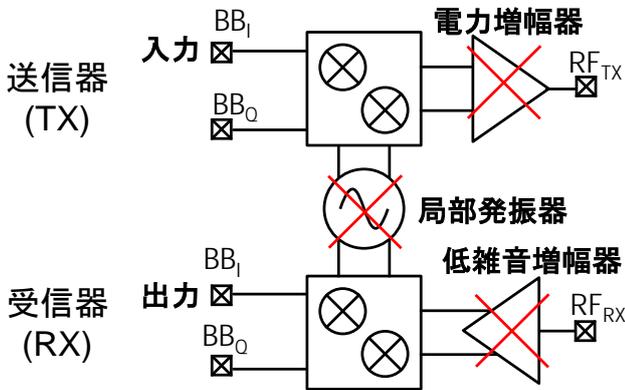


図 6 300GHz 帯 CMOS トランシーバでは 300GHz 帯の増幅器および局発振器を実現することができない。

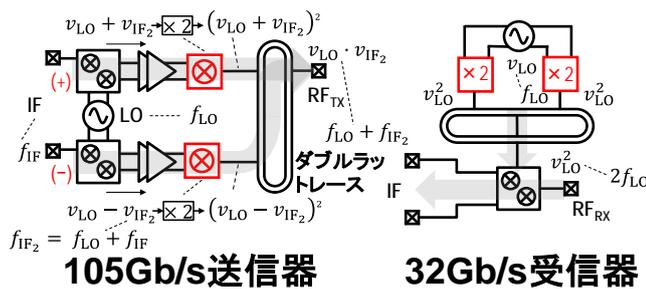


図 7 300GHz 帯 CMOS 送信器と受信器のブロック図

300GHz 帯 CMOS トランシーバを実現するうえで、一番の課題は、CMOS 集積回路における NMOSFET のユニティゲイン周波数（電力整合されている条件で電力利得が 1 になる周波数）が 300GHz 以下あるいは 300GHz 付近にとどまることである。そのため、300GHz 帯増幅器や 300GHz 帯局発信回路を実現することが困難である。そのため、図 6 に示すように

通常のトランシーバに用いられる電力増幅器や低雑音増幅器を用いることができない。また、搬送波生成も逡倍器を用いる必要がある。

そのため、電力増幅器のない送信器と低雑音増幅器のない受信器を構成する必要がある(図 7)。300GHz 帯 CMOS 送信器では、電力増幅器が省略されているために、300GHz 帯信号を生成するミキサが最終段に用いられる[5]。ひとつのミキサの生成する出力電力は限られるために、無線通信に必要な電力を生成するために、最終段ミキサの出力を並列結合する。最終段ミキサを並列接続するために、1 入力 1 出力である 2 逡倍器(ダブル)をミキサとして最終段に用いる。送信器ではヘテロダイナーキテクチャが用いられる。初段のミキサでは 150GHz 近辺の変調された中間周波数(IF)信号に加え局発振(LO)信号が出力される。両者は同一周波数帯のために、ひとつの信号線に重畳されて同時に増幅器で増幅される。増幅された LO 信号と IF 信号はダブル(ミキサ)で 2 乗される。あるミキサには $(v_{LO} + v_{IF})$ 信号が入力され、別のミキサには $(v_{LO} - v_{IF})$ 信号が入力される。ミキサの出力にはそれぞれ $(v_{LO} + v_{IF})^2$ と $(v_{LO} - v_{IF})^2$ が出力される。2 つの信号の差動成分をバランで得ることにより、 $(v_{LO} + v_{IF})^2 - (v_{LO} - v_{IF})^2 = 4v_{LO} \cdot v_{IF}$ というミキサの所望波だけを得ることができる。

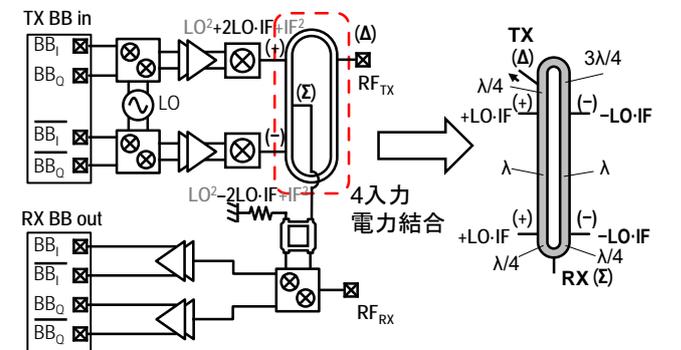


図 8 300GHz 帯 CMOS ワンチップトランシーバのブロック図。送信器と受信器を統合するためにラットトレースバランの派生であるダブルラットトレース回路を用いた。

一方、300GHz 帯 CMOS 受信器では低雑音増幅器のないミキサファーストアーキテクチャを用いることになる[6]。この場合、ダウンコンバージョンミキサの損失と雑音指数が受信器の性能を決めるために、両者を小さくしなければならない。周波数が高くなるとサブハーモニックの LO 信号を用いるハーモニックミキサを用いられる場合が多いが、基本波ミキサと比較しハーモニックミキサは変換損が大きく受信器の性能が劣化する。変換損は基本波ミキサの方

がハーモニックミキサよりも小さくすることができる。ただし、基本波ミキサの変換損を小さくするためには十分に大きな電力の LO 信号を与える必要がある。そこで、十分に大きな電力の LO 信号を生成するために、LO を生成する 2 通倍器の出力を並列に接続することにより電力結合している。

これらの送信器および受信器をワンチップとするためには、両者を統合する必要がある。300GHz 帯ワンチップトランシーバのブロック図を図 8 に示す[7]。IEEE 802.15.3d のチャンネル 66 を用いるために RF 信号はおよそ 266GHz となる。ラットレース回路には差動出力ポートと同相出力ポートが備わっている。そこで、送信モードで用いる場合には、送信(TX)ベースバンド(BB)に変調信号を入力し、133 GHz (=266/2 GHz)の LO 信号を用いて初段ミキサでアップコンバージョンを行う。アップコンバージョンされた信号の中で変調された中間周波数信号(v_{IF})は 2 つの信号経路に互いに逆相で局部発信信号(v_{LO})に重畳する。ダブル (ミキサ) の出力に接続されたラットレース回路の差動信号ポートから所望の信号を得る。一方、受信モードでは TXBB 信号をオフにする。すると、初段ミキサは局部発信信号(v_{LO})だけが出力される。ダブルの出力では 266GHz の (v_{LO}^2)信号が生成される。複数のダブルの出力をラットレース回路の同相信号ポートから取り出すことにより、ダブルの出力を電力結合することができる。出力電力が増強された LO 信号を基本波ミキサに供給することにより基本波ミキサの変換損を抑えることが可能となる。

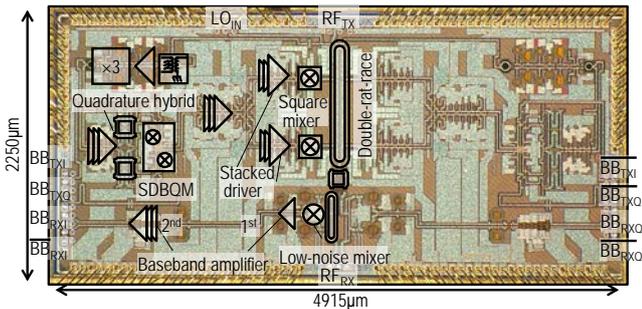


図 9 300GHz 帯 CMOS ワンチップトランシーバのチップ写真

300GHz 帯ワンチップトランシーバは 40nm CMOS プロセスを用いて試作した。チップ写真を図 9 に示す。チップサイズは 2.3mm×4.9mm である。300GHz 帯ワンチップトランシーバ回路を用いた通信実験の様子を図 10 に示す。送信用基板と受信用基板は、CMOS 集積回路は同一であるが、それぞれ送信モードと受信モードを実現する基板上に実装されている。

基板に実装された CMOS 集積回路は導波管プローブを用いて 300GHz 帯の信号の入出力を行った。導波管プローブには 24dBi の標準ゲインホーンアンテナが装着されている。図 10 には主要性能と 80Gb/s 時のコンステレーションとスペクトラムを示している。消費電力は送受信合わせて 1.8W、最大出力電力は -1.6dBm であった。

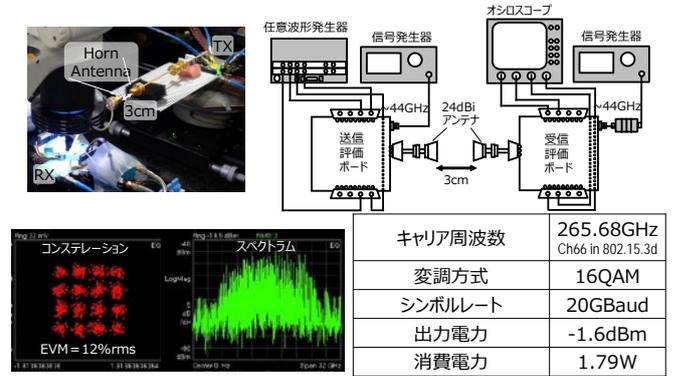


図 10 ワンチップ CMOS トランシーバの通信実験のブロック図と主要性能

3. 広帯域無線通信の課題

300GHz 帯無線通信回路は、2 章で示したように CMOS 集積回路を用いて実現されている。もし搬送波周波数がこのまま増加し、ベースバンド回路の帯域が広がり続ければ通信速度は無限大とすることができるのであろうか。

理論的な通信容量 C を与えるシャノン・ハートレーの定理によると

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

で与えられる。ここで B は周波数帯域、 S は信号電力、 N は雑音電力である。無線通信での S は受信電力 P_r となる。 N は

$$N = kTB \cdot NF \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 NF は雑音指数である。(2)を(1)に代入することにより

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_r}{kTB \cdot NF} \right) \quad (3)$$

を得る。通常の無線通信では、 S は N に比べ十分に大きくなるため、 $B \ll P_r / (kT \cdot NF)$ となる。このとき、(3)は

$$C \approx B \left(\log_2 \frac{P_r}{B} - \log_2 (kT \cdot NF) \right) \quad (4)$$

となる。 \log の中にも含まれる B は、カッコの外にある B に比べ変化が小さいために、 C は B に対してほぼ比例して増加する。一方、 S が N に比べ小さくなる、

すなわち $B > P_r / (kT \cdot NF)$ では、(3)式は

$$C \approx \frac{P_r}{kT \cdot NF \cdot \ln 2} \quad (5)$$

となり、 B によらず一定の値となる。

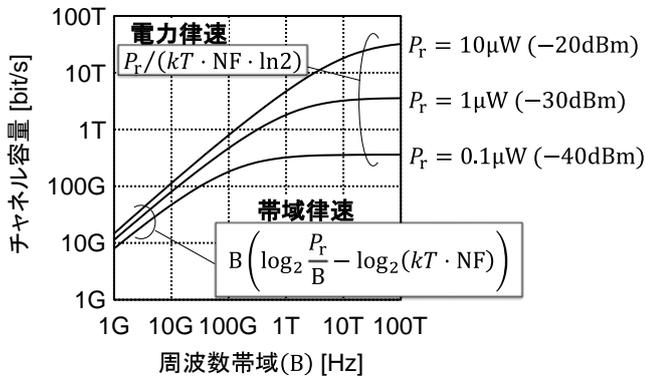


図 11 受信電力 P_r を変えたときの周波数帯域の変化によるチャネル容量の変化の様子。この計算では、 $T = 290\text{K}$, $NF = 20\text{dB}$ とした。チャネル容量は周波数帯域を広げると飽和する。

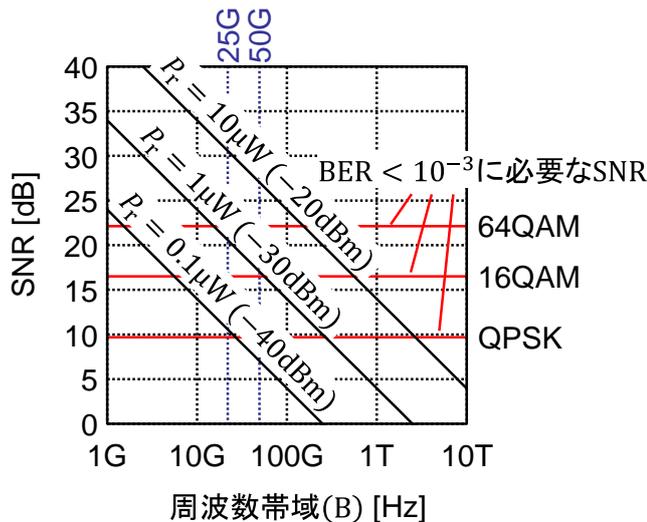


図 12 受信電力を変えたときの周波数帯域の変化による信号雑音電力比(SNR)の変化の様子。QPSK, 16QAM, 64QAM を復調するために必要な SNR を赤線で示す。 $T = 290\text{K}$, $NF = 20\text{dB}$ とした。

図 11 に受信電力 P_r を変えたときの周波数帯域の変化によるチャネル容量の変化の様子を示す。広帯域特性を活かしチャネル容量を増加させるためには受信電力を増大し飽和チャネル容量を増加させることが不可欠であることがわかる。

通常の無線通信では S は N に比べ十分に大きい。図 12 には、受信電力を変えたときの周波数帯域の変化による信号雑音電力比 (SNR) の変化の様子を示す。25GHz の周波数帯域を実現するには、QPSK であっ

ても $0.1\mu\text{W}$ 以上の受信電力が必要となる。100GHz 級の周波数帯域を実現するには $1\mu\text{W}$ (-30dBm) 近くの受信電力が必要となる。通常用いられるマイクロ波の通信では 1nW (-60dBm) 以下の受信電力が用いられることに比べると、広帯域通信を実現するためには、搬送波周波数とは無関係にけた違いに大きな受信電力が必要となることがわかる。

一方、搬送波周波数と受信電力の関係はどのようになっているのだろうか。受信電力 P_r はフリスの公式により

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (6)$$

で与えられる。ただし、 P_t は送信電力、 G_t と G_r はそれぞれ送信アンテナと受信アンテナの利得、 λ は波長、 d は通信距離である。(6)によると、アンテナ利得が一定であれば、 P_r は λ^2 に比例して小さくなる。すなわち搬送波周波数が高くなると P_r は小さくなる。このため、搬送波周波数が高いことは遠距離通信に向いていないと考えられることが多い。一方で、アンテナ利得 G_t は

$$G_t = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e \quad (7)$$

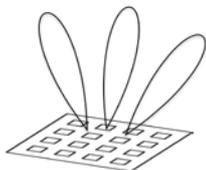
で与えられる。ただし、 A_e はアンテナの実効面積である。(7)を(6)の G_t と G_r に適用することにより、

$$P_r = P_t \frac{A_t A_r}{(\lambda d)^2} \quad (8)$$

を得る。ただし、 A_t と A_r はそれぞれ送信アンテナと受信アンテナの実効面積である。(8)によると、実効アンテナ面積が一定であれば P_r は λ^2 に反比例して大きくなる。すなわち搬送波周波数が高くなると P_r は大きくなる。したがって、テラヘルツ通信のように搬送波周波数が極めて高い通信であっても、マイクロ波で用いられていると同様の大きさのアンテナを用いれば十分に長距離を伝送することも可能といえる。もちろん、アンテナの実効面積が一定であるということは、(7)よりアンテナ利得は λ^2 に反比例して増加するために搬送波周波数が増加するにつれビームが絞られることになる。広帯域通信を実現するためには搬送波周波数を増加させなければならないが、搬送波周波数を増加させるとビームを絞ることが要求されることになる。広範囲に電力を拡散する放送型の通信を実現することは困難である。

ビームを絞ることが必然であれば、その方向を正確に制御する必要がある。ビーム制御を電子的に行う方法にフェーズドアレイアンテナがある。フェーズドアレイアンテナではアンテナ素子間の位相制御によりビームの方向を制御する。それぞれのアンテナ素子に送信器を接続するとすれば、アンテナの指

向性が高まるだけでなく、空間合成された送信器の出力電力も増大する。CMOS トランシーバではトランジスタの高周波性能が 300GHz 帯の増幅器を実現させるために十分でないことからひとつの送信器で大きな出力電力を得ることが難しい。しかし、フェーズドアレイアンテナで空間合成すればその欠点を克服することができる。また、フェーズドアレイアンテナでビーム指向性を制御するにはデジタル回路による制御が必要となるが、デジタル回路の実装には CMOS 集積回路が適している。図 13 にはフェーズドアレイアンテナの素子数を変えた場合の空間合成された出力電力とアンテナ利得を示している。たとえば 16384 素子を並列に接続する場合、送信器単体の出力電力が 1mW であったとしても空間合成された出力電力は 16W にも達する。アンテナ利得は 50dBi となる。このような高出力かつ高アンテナ利得が実現できるとすれば、この後考察するように、宇宙への通信に応用することも夢ではない。たとえこのような高素子数フェーズドアレイアンテナであっても、アンテナ全体のサイズは (1 波長間隔で並べると仮定すれば) わずか 13cm×13cm しかなく、決して巨大なシステムではない。このことはテラヘルツ通信に対する CMOS 集積回路の適性を示唆しているのではないだろうか。



フェーズドアレイアンテナ

	出力電力	アンテナ利得
4並列(2x2)	6dBm(4mW)	13dBi
64並列(8x8)	18dBm(64mW)	25dBi
1024並列(32x32)	30dBm(1W)	38dBi
16384並列(128x128)	42dBm(16W)	50dBi

図 13 フェーズドアレイアンテナを用いた場合の素子数と出力電力、アンテナ利得の関係。出力 0dBm、アンテナ利得 7dBi をもつ送信器を並列に用いる場合の試算。

4. 300GHz 帯通信の特徴と応用

テラヘルツ通信が実用化されたときの応用は、通信距離を含む通信特性に依存する。そこで、まずその特性について考察し、それに適した応用について考えてみる。

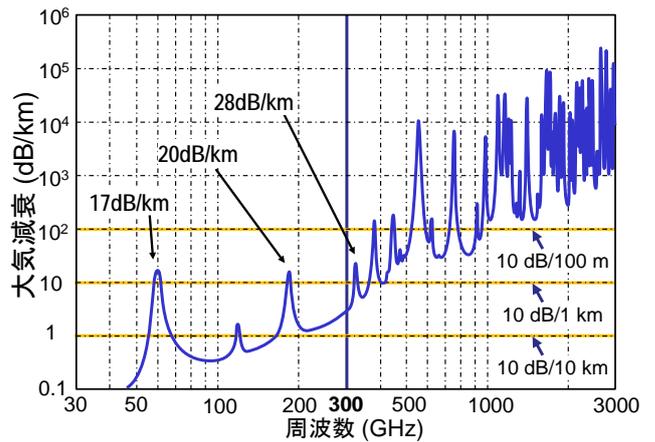


図 14 30GHz から 3THz における電波の大気減衰。60GHz, 183GHz, 325GHz において距離 1km で大気減衰が 10dB を超えるピークがあるほか、351GHz 以上ではすべての周波数で大気減衰が 10dB/km を超える。それ以外の周波数では、距離 1km では大気減衰の影響はあまり大きくない。

4.1 テラヘルツ帯通信の特性

テラヘルツ帯は大気減衰が大きく近距離通信に限定されると思われるかもしれない。実際のところ大気減衰の影響はどれくらいであろうか。図 14 には 30GHz から 3THz までの大気減衰を示す[8,9]。大気減衰が 10dB 以下であれば、その影響は比較的小さい。一方で、たとえば 1km での大気減衰が 10dB を超えると、キロメートル級の通信が困難になる。このような周波数は、60GHz、183 GHz、325GHz と 351 GHz 以上である。これらの周波数を除けば、少なくとも 1km 程度の中距離通信には大気減衰の影響は比較的小さい。252GHz から 296GHz にかけて大気減衰が 10dB となる距離が 2km を超える周波数帯が存在する。これが、300GHz 帯が通信用途として注目される一つの理由となりうる。

4.2 300GHz 帯通信の応用例

300GHz 帯は光通信と同等のデータレートが実現できることから、IEEE 802.15.3d の PAR (Project Application Request)には、光通信を無線通信に置き換える無線バックホール/フロントホール、機器内無線通信、データセンター用ポイント間切り替え接続の他、キオスクダウンロードのような近接無線応用が示されている[10]。

一方で、遅延時間が小さいことは光通信に対する無線通信の利点のひとつである。電磁波の伝搬速度は、媒質の誘電率の平方根に反比例する。このため、大気の大気電磁波の伝搬速度は光ファイバに比べおよそ

50%速く、無線通信はリアルタイム応用に優れている。この性質を利用し、ニューヨークとシカゴ間に2億5000万ドルを費やして高速取引専用のマイクロ波回線が敷かれた[11]。テラヘルツ通信では、光通信と同等の通信容量を低遅延で伝送することが可能である。8Kのフル規格映像を非圧縮で伝送する場合、最大毎秒144ギガビットの通信容量が必要となる。デジタル変調のロールオフ係数を0.22に設定すると44GHzの帯域があれば、16QAMで毎秒144ギガビットの無線通信が可能となる。この周波数帯域は300GHz帯であれば割当可能である。たとえば、8Kカメラを搭載したドローンを用いれば、迅速に災害箇所や遭難場所の状況をリアルタイムで観察することも可能となる。これは、従来の無線通信や光通信では実現できない新しい応用となる。

4.3 テラヘルツ帯通信の宇宙応用

将来、大出力のテラヘルツ送信器と高利得アンテナが利用できるよになれば、アンテナ実効面積が一定の条件で周波数が高いほど受信電力が増大するテラヘルツ通信は、大気減衰の無い宇宙には有望な応用になると考えられる。300GHz帯であれば1.2mほどのアンテナ径で70dBiのアンテナ利得が得られる。利得Gのアンテナが距離d離れた位置につくるビームの直径φは、周波数によらず

$$\phi \approx \frac{4d}{\sqrt{G}} \quad (5)$$

で与えられる。70dBiのアンテナを用いると1000km先のビームの直径は1.3kmとなる。レーザー光よりもビーム径が広がるテラヘルツ通信は、アンテナの位置制御の要件を緩和するのに役立つ。さらに、大気減衰がない宇宙でのテラヘルツ通信では300GHz帯以上の周波数帯も活用可能である。およそ標高5000mで大気密度は平地の半分になるため、降雨減衰のない砂漠であれば理論上は地上と宇宙間を安定して高速通信できる可能性がある。

社会課題の解決にテラヘルツ通信を活用できないだろうか。たとえば、実社会の様々な現象を大規模かつ正確にシミュレーションするために、スーパーコンピュータの性能向上は欠かせない。スーパーコンピュータの性能向上をこれからも期待するならば、解決しておかなければならない課題は何であろうか。スーパーコンピュータの演算性能は指数関数的に向上しており、およそ10年で1000倍となっている。現在、1秒間に100京回(10¹⁸回)浮動小数点演算を行うことのできるエクサスケールコンピュータ富岳は2020年に稼働が始まった。もし、この先も演算速度の向上が続くとすれば2030年には1秒間に10垓回

(10²¹回)という途方もない速度で浮動小数点演算を行うことのできるゼッタスケールコンピュータが誕生することになる。ここでひとつ問題となるのが消費電力である。富岳の消費電力は28MWといわれている[12]。一方で、演算能力が1000倍高いゼッタスケールコンピュータでは一層の低消費電力化が進められるだろうが、その消費電力はGW級になるのではなかろうか。1GWの消費電力はおよそ原子力発電機1機に相当する。このようなスーパーコンピュータの膨大な消費電力を賄いつつ持続可能な社会を維持するためにはどうすればよいのであろうか。安定した再生可能エネルギーの候補のひとつとして、静止軌道衛星上の2.5km四方の太陽パネルを用いる宇宙太陽光発電の研究が進められている[13]。この太陽光パネルは1GWを発電できると言われている。宇宙太陽光発電で作られる電気はマイクロ波を用いて地上に送電される。この送電効率の目標は50%となっている。しかし、スーパーコンピュータを宇宙に設置し、宇宙太陽光で発電された電力をその場で消費すれば、送電損失なく電力を有効に活用できる[14]。光ファイバを敷設することのできない宇宙のスーパーコンピュータに対する大容量のデータ交換が必要となるが、ここに超高速テラヘルツ通信を用いることは可能であろう。

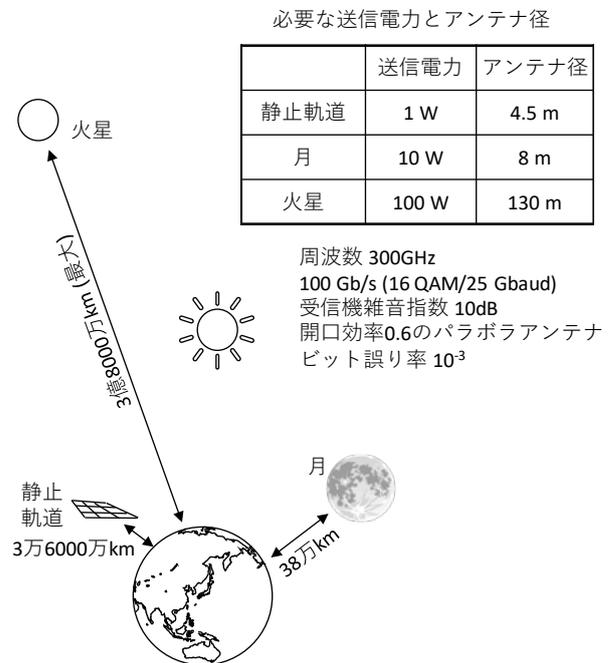


図 15 300GHz 帯通信を宇宙に用いるときに必要となる性能の試算結果。将来、テラヘルツ通信の送信電力が大きくなれば、宇宙に向けた広帯域通信リンクを形成することも可能になる。

また、1兆個を超える膨大なセンサで実社会をモ

文 献

- [1] T. Kürne, IEEE 802.15-10-0320-02-0000-Tutorial_Igthz
- [2] K. K. Tokgoz et al., "A 120Gb/s 16QAM CMOS millimeter-wave wireless transceiver," 2018 IEEE International Solid - State Circuits Conference - (ISSCC), San Francisco, CA, 2018, pp. 168-170, 2018.
- [3] "Sharing and compatibility studies between land-mobile, fixed and passive services in the frequency range 275-450 GHz," Report ITU-R SM.2450-0, June 2019.
- [4] IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks, Amendment 2: 100 Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer, IEEE Computer Society sponsored by the LAN/MAN Standards Committee.
- [5] K. Takano, S. Amakawa, K. Katayama, S. Hara, R. Dong, A. Kasamatsu, I. Hosako, K. Mizuno, K. Takahashi, T. Yoshida, M. Fujishima, "A 105Gb/s 300GHz CMOS transmitter," 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 308-309, Feb. 2017.
- [6] S. Hara, K. Katayama, K. Takano, R. Dong, I. Watanabe, N. Sekine, A. Kasamatsu, T. Yoshida, S. Amakawa, M. Fujishima, "A 32 Gbit/s 16QAM CMOS receiver in 300 GHz band," 2017 IEEE International Microwave Symposium (IMS2017), pp. 1-4 (8 June 2017)
- [7] S. Lee et al., "An 80-Gb/s 300-GHz-Band Single-Chip CMOS Transceiver," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 54, no. 12, pp. 3577-3588, Dec. 2019.
- [8] P. Baron, J. Mendrok, Y. Kasai, S. Ochiai, T. Seta, K. Sagi, K. Suzuki, H. Sagawa, and J. Urban "AMATERASU: Model for Atmospheric TeraHertz Radiation Analysis and Simulation," *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 109-121, 2008.
- [9] Recommendation ITU-R P.676-11, "Attenuation by atmospheric gases," P Series Radiowave propagation Cookson, Sep. 2016.
- [10] http://www.ieee802.org/PARs/2015_11/15-15-0682-01-003d-3d-par-change.pdf
- [11] "Time is Money When It Comes to Microwaves," *FT Magazine*, May 10, 2013.
- [12] <https://www.top500.org/system/179807/>
- [13] M. Mori, H. Kagawa, and Y. Saito, "Summary of studies on space solar power systems of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)," *Acta Astronautica*, vol. 59, no. 1-5, pp. 132-138, 2006.
- [14] M. Fujishima, S. Amakawa, "Integrated-Circuit Approaches to THz Communications: Challenges, Advances, and Future Prospects," *IEICE TRANSACTIONS ON Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. 100, no. 2, pp. 516-523, 2017.
- [15] G. Daines, "NASA's Journey to Mars." NASA, www.nasa.gov/content/nasas-journey-to-mars. 2015.

著者紹介

昭 63 東京大・工・電気卒. 平 5 同大学院博士課程了. 同年東京大・工・電子工学科助手. 以来, 非線形回路、量子回路、ミリ波回路の研究に従事. 平 21 広島大・先端物質科学研究科教授. 令 2 より広島大・先進理工系科学研究科教授. 工博. IEEE, 電子情報通信学会、応用物理学会会員. 平 23 年度エレクトロニクスソサイエティ賞. 電子情報通信学会フェロー.

ニタし, その情報を人工知能で活用する時代となりつつある. センサから得られる情報はそのまま蓄えられるわけではないものの, 蓄えられるデータ量は指数関数的に増大する一方である. その一方で時間がたつてアクセス頻度が低くなるコールドデータも増大する一方である. コールドデータはアクセス頻度が低いために, アクセス速度は重要ではない. 遅いアクセスを許容するなら, コールドストレージデータセンタを地球以外の, 例えば月面に建設することも可能であろう[14]. 月までの光の伝搬時間は 1.3 秒である. したがって, アクセス速度は往復で 3 秒程度となるが, 月面の有効活用のひとつとして考えられるのではないだろうか.

さらに, 現在火星への有人探査と人類の移住が検討されている[15]. 火星に移住した人類が地上と通信する手段は無線に限られる. 100 Gb/s のデータレートで情報が送られれば, 1 日で 1 ペタバイトを送ることができる. 火星が地球から最も遠くなると光でも伝搬するのに 21 分かかるためリアルタイムにはならないが, テラヘルツ通信を使えば地球と火星で大容量の情報を交換することが可能である.

静止軌道, 月, 火星にテラヘルツ通信を実現するために必要となる性能を図 15 に試算した. すぐに実現できる技術とは言えないかもしれないが, 人類の持続的な発展のために挑戦する価値のある研究課題となるのではないだろうか.

5. まとめ

300GHz 帯は大気減衰が比較的小さく、44GHz の広い利用可能な周波数帯域である. 有線通信と同等のデータレートを実現できる 300GHz 帯無線通信は、2020 年以降の宇宙計画にも影響を与える可能性を秘めている. また、商用の光通信用 CMOS 超高速ベースバンド信号処理チップとテラヘルツフロントエンドと組み合わせれば, 近い将来テラヘルツ通信は実用化されるであろう. ミリ波帯よりも高精度にビーム制御を行うことができれば遠距離通信も夢物語ではなくなるであろう. 互いの位置情報を共有する技術の進展などで現在の課題が克服され、テラヘルツ通信が社会に役立つ日が訪れることを願っている.

謝辞 本研究開発は、総務省の「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254)」によって実施した成果を含む. 情報通信研究機構、パナソニック、ザインエレクトロニクス、名古屋工業大学、東京理科大学、広島大学の関係各位に深謝する.