

6G 通信用ミリ波発生技術と周波数のトレーサビリティに関する調査研究

中島悠来*

(2023年1月31日受理)

Study on Millimeter-Wave Generation Technology and Frequency Traceability for 6G Communications

NAKAJIMA Yuki

Abstract

Data traffic in wireless communications is increasing year by year, and higher wireless transmission rates are required through the use of high frequency bands. The use of millimeter waves in the 300 GHz band is being considered for the 6th generation mobile communication system (6G), and one of its technical requirements is frequency management to prevent interference. In this study, we consider the frequency management required for 6G and describe SI-traceable frequency generation techniques for the millimeter-wave band that will be required. In addition, we present the configuration of 6G base stations using these technologies and discuss the optical frequency comb method and its advantages.

1. はじめに

移动通信システムとは、携帯電話など移動を伴う無線機器の通信のためのものであり、国際電気通信連合 (ITU) が定める規定を満足する無線通信システムである。これまで約10年おきに新しい世代の通信方式へと進化しており、現在は第5世代 (5G) である。第4世代 (4G: 2010年~) では、周波数の利用効率の向上や伝送容量の拡大、複数の周波数チャンネルを用いた周波数帯域幅の拡大が行われたことで大幅な高速大容量化が実現し、スマートフォンの普及が進んだ。そして、第5世代 (5G: 2020年~) と第6世代 (6G: 2030年ごろ開始予定) では、急増するデータトラフィックへの対応や、様々な産業・分野への応用のため、通信の更なる高速大容量化が求められている。移动通信システムの構成の概略図を図1に示す¹⁾。コアネットワーク (またはバックボーン) と呼ばれる大容量通信回線により、無線基地局はインターネットや固定電話ネットワークと結ばれている。そして無線基地局は携帯電話などの端

末と無線通信を行う。一般に、無線通信では無線信号を運ぶ周波数をキャリア周波数と呼び、使用するキャリア周波数の範囲を (周波数) 帯域幅と呼ぶ。通信速度 C と帯域幅 B とは比例し、信号雑音比 S/N を用いて $C = B \log_2(1 + S/N)$ の関係がある。これはシャノン・

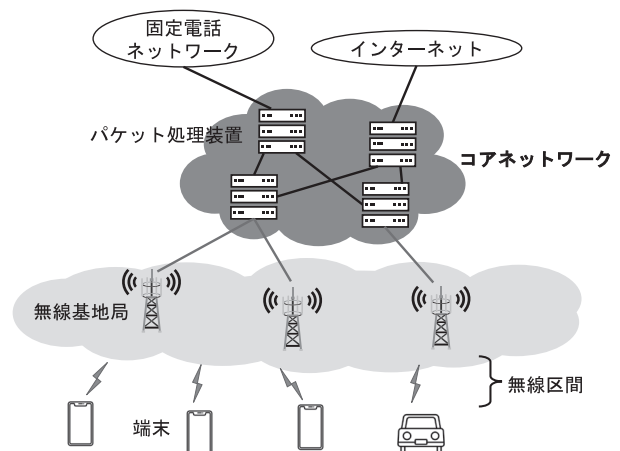


図1 移动通信システムの構成の概略. 図は出典¹⁾から修正引用

* 物理計測標準研究部門 光周波数計測研究グループ

ハートレーの定理として知られている²⁾。よって、通信の高速大容量化には帯域幅の拡大が必要であり、広い帯域幅の確保には高いキャリア周波数の利用が必要である。表1に示すように、世代が進むにつれより高い周波数帯域が使われるようになってきた^{3),4)}。これに伴い図2に示すように、通信速度が大幅に向上してきた。6Gでは周波数100 GHz以上のミリ波帯の使用が検討され⁴⁾、100 Gbpsを超える通信速度が実現すると予想されている⁵⁾。

2. 移动通信システムにおける周波数管理

周波数は時間の逆数であり、時間の単位「秒」は国際単位系 (SI) の基本単位である。秒はセシウム原子のマイクロ波帯 (約 9.2 GHz) の遷移を使って実現され、その国際的な利用のために世界の計量標準機関等が開発した一次周波数標準器や、その他多数の商用原子時計を国際的に比較することにより、協定世界時 (UTC) が国際度量衡局 (BIPM) を中心に維持・運用されている。UTC は実質的な時間周波数標準であり、本調査研究では UTC に基づいた周波数を「SI トレサブルな周波数」と呼ぶ。

2つのクロック周波数 (データ信号の時間区切りを決める周波数) が一致しているだけでなく、さらにそのタイミングが UTC に位同期していることを時刻同期と呼ぶ⁷⁾。4G(LTE-Advanced) 以降、上りと下りの信号間の電波干渉を回避するため、基地局間の高精度な時刻同期が必要となっており⁸⁾、使用される外部参照信号の周波数相対精度は国際電気通信連合電気通信標準化部門 (ITU-T) で、1年あたり $\pm 1.6 \times 10^{-8} \text{Hz/Hz}$ 以下と標準化されている⁹⁾。また、移动通信システムの国

際標準仕様を策定する機関である 3GPP(3rd Generation Partnership Project) は、クロック周波数とキャリア周波数を同一の周波数源から発生させることを要求している¹⁰⁾ため、基地局では UTC に基づいてクロック周波数およびキャリア周波数を合成することが必要である。本章では具体的な周波数管理技術について述べる。

2.1 5G までの周波数管理

表2に5Gで利用される周波数帯と各移動体通信事業者への周波数割り当てを示す。4Gまでは3.5 GHz帯以下の周波数が使われてきたが、5G用に3.7 GHz帯以上の高周波帯が割り当てられ (2019年4月)、後に4Gまでに使われていた周波数帯が5G用に割り当てられた (2020年8月)¹¹⁾。各移動体通信事業者は、それぞれの持つ基地局で周波数管理を行っている。図3(a)に基地局全体の構成を示す。周波数源からの信号を二分し、一方はキャリア周波数の合成に用い、もう一方はクロック周波数の合成に用いる。その後、キャリア周波数と

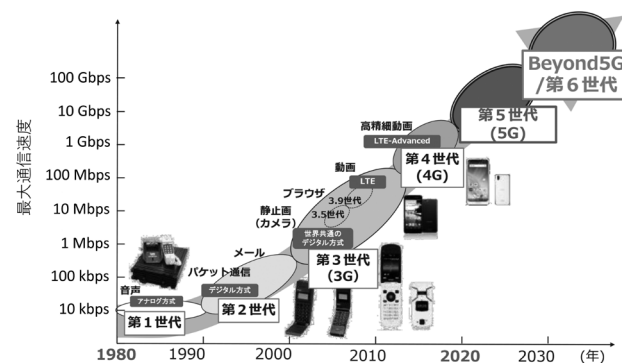


図2 移动通信システムの発展. 図は出典⁶⁾から修正引用

表1 各世代の使用周波数帯. 出典³⁾をもとに作成

使用周波数帯	0.7 GHz 帯	0.8 GHz 帯	0.9 GHz 帯	1.5 GHz 帯	1.7 GHz 帯	2.5 GHz 帯	3.7 GHz 帯	ミリ波帯
通信世代								
1G	—	○	—	—	—	—	—	—
2G	—	○	—	○	—	—	—	—
3G	○	○	○	○	○	—	—	—
4G	○	○	○	○	○	○	—	—
5G	○	○	○	○	○	○	○	—
6G	○	○	○	○	○	○	○	○

表 2 5G において各移動体通信事業者に割り当てられた周波数帯と周波数帯域幅. 高周波帯になるにつれて利用できる周波数帯域幅が広がっている. 表は出典¹¹⁾から修正引用

使用周波数帯	0.7 GHz 帯	0.8 GHz 帯	0.9 GHz 帯	1.5 GHz 帯	1.7 GHz 帯	2 GHz 帯	2.5 GHz 帯	3.4 GHz 帯	3.5 GHz 帯	3.7 GHz 帯	28 GHz 帯	4.5 GHz 帯
NTT ドコモ	20 MHz	30 MHz	-	30 MHz	40 MHz	40 MHz	-	40 MHz	40 MHz	200 MHz	400 MHz	
au	20 MHz	30 MHz	-	20 MHz	40 MHz	40 MHz	-	-	40 MHz	200 MHz	400 MHz	
UQ モバイル	-	-	-	-	-	-	50 MHz	-	-	-	-	
ソフトバンク	20 MHz	-	30 MHz	20 MHz	30 MHz	40 MHz	-	40 MHz	40 MHz	100 MHz	400 MHz	
Wireless City Planning	-	-	-	-	-	-	30 MHz	-	-	-	-	
楽天モバイル	-	-	-	-	80 MHz	-	-	-	-	100 MHz	400 MHz	

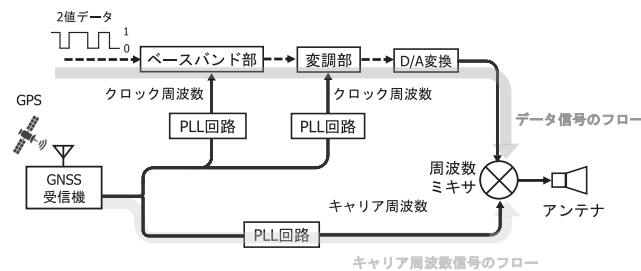
データ信号を周波数ミキサで混合し足し合わせて、無線信号を得ている。周波数の合成に用いる、位相同期ループ (Phase Locked Loop:PLL) 回路の構成を図 3 (b) に示す。基準周波数 f_{ref} を $1/M$ 分周した信号と、電圧制御発振器 (Voltage-Controlled Oscillator:VCO) からの出力周波数 f_{out} を $1/N$ 分周した信号の位相が等しくなるように VCO を帰還制御して $f_{out} = \frac{N}{M} \cdot f_{ref}$ の周波数を出力する。3G 以降は全地球航法衛星システム (Global Navigation Satellite System:GNSS) により人工衛星から原子時計に基づく信号を受信し、基準時刻・基準周波数信号として利用する基地局が増えている。GNSS の中でも全地球測位システム (Global Positioning System:GPS) が多くの場合用いられる。GPS 時刻は米国海軍天文台が維持する時系 UTC(USNO) と比較され、その差は数ナノ秒以下に抑えられているため^{12),13)}、その精度は相対値で 1 年あた

り 10^{-13} 程度である¹⁴⁾。これは前述の ITU-T で標準化された周波数相対偏差の許容量である 1 年あたり $\pm 1.6 \times 10^{-8}$ Hz/Hz よりも十分小さい。5G では GPS 信号を用いることで高精度かつ安定な周波数管理が行われている。

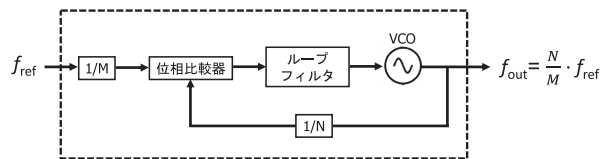
2.2 6G で予想される周波数管理

6G では 100 GHz から 300 GHz までの周波数帯の使用により、5G と比べて通信のさらなる高速・大容量化が計画されている。100 GHz から 300 GHz までの周波数領域は、国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) が定めたミリ波帯 (EHF)¹⁵⁾ に含まれるが、100 GHz から 10 THz 以下の領域はしばしば THz 帯とも呼ばれる^{4),16)-18)}。図 4 に、周波数ごとの電磁波の名称をまとめる。

300 GHz よりもさらに高周波を利用すれば帯域幅の拡大が可能だが、そのような高周波帯では、電磁波の伝播



(a) 基地局の構成の概略図. D/A 変換: デジタル信号からアナログ信号への変換部, GPS: 全地球測位システム, GNSS: 全地球航法衛星システム, PLL 回路: 位相同期ループ回路



(b) PLL 回路 (位相同期ループ回路) の構造. VCO: 電圧制御発振器

図 3 基地局での周波数管理. 図は出典¹⁴⁾から修正引用

ロスが大きいことが問題となる。一般に、空間中を伝搬する電磁波が受ける損失は、真空中を伝搬する際に受ける自由空間伝播損失 (Free-Space Path Loss: FSPL) と大気中に含まれる水蒸気や酸素による吸収に分けることができる。FSPL による損失の大きさ L_0 は、伝送距離 R 、電磁波の周波数 f 、光速 c を用いて $L_0 = \left(\frac{4\pi Rf}{c}\right)^2$ と書ける¹⁹⁾。図5に、電磁波の周波数と損失の関係を示す。高周波帯に及ぶにつれて、FSPL による損失が大きくなり、大気による吸収も増えていること、距離の増加に伴い吸収ピークが大きくなっていることがわかる。ただし、周波数によっては損失が比較的小さい領域があり、例えばおよそ 200 GHz から 320 GHz までの領域は通信に用いることが可能と考えられている¹⁷⁾。なお、豪雨の中では現状の送信機や受信機、アンテナでは伝播距離が十分ではなく、それらの性能向上が技術的な課題である¹⁷⁾。

近年、300 GHz 帯の無線規格の策定²⁰⁾やミリ波帯周波

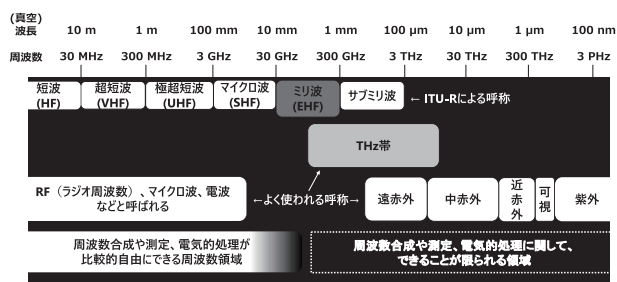


図4 電磁波の周波数バンド

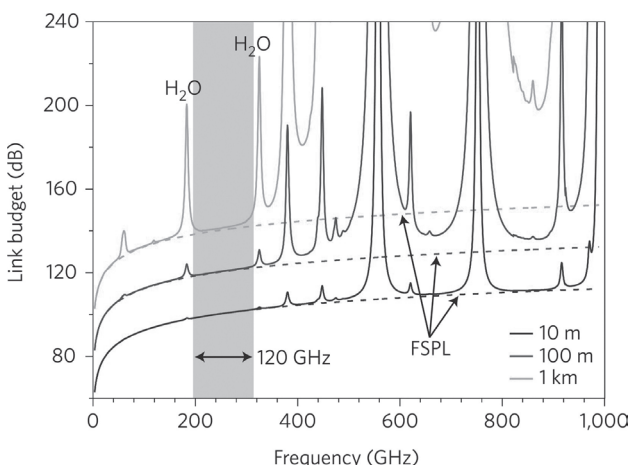


図5 ミリ波帯・サブミリ波帯での電磁波の減衰。送信機と受信機は等方的にゲイン 0 dB とし、気温 23 °C、湿度 2.59 % を仮定している。図は出典¹⁷⁾から引用

数の実験用途での解放^{21),22)}など、ミリ波通信実現に向けた整備が国内外で進められている。実用化のためには、SI トレサブルなミリ波帯周波数が必要となる。

3. SI トレサブルなミリ波帯周波数合成法

UTC と GPS 時刻は周波数 10 MHz で比較されており、GPS 受信機も 10 MHz の基準信号を出力する。従って、SI トレサブルな周波数をミリ波に付与するためには、10 MHz を元にミリ波帯周波数を合成する必要がある。具体的な方法は2つに大別され、周波数通倍を繰り返す「周波数チェーン」と呼ばれる方法と、光コムを用いて光周波数を経路する方法とがある。以下それぞれの手法について説明する。

3.1 周波数チェーンによるミリ波帯周波数合成

基準周波数 10 MHz に対し、周波数通倍を繰り返すことで所望のミリ波帯周波数を得ることができる。例えば図6のような系で 10 MHz からミリ波帯周波数が合成されている²³⁾。ここでは、10 MHz の水晶発振器の信号を元に位相同期誘電体発振器 (Phase-locked Dielectric Resonator Oscillator: DPRO) で 16.66 GHz を出力し、周波数の 3 通倍を二度繰り返すことで 150 GHz とする。そして、別の信号発生器から出力された信号 (DC から 10 GHz) と高調波ミキサで混合する。高調波ミキサは 150 GHz の周波数 2 通倍と、信号発生器の出力周波数との和周波と差周波を発生し、290 GHz から 310 GHz までの周波数可変な出力が得られている。10 MHz の発振器および信号発生器を GPS 受信機からの 10 MHz 信号に同期させれば、この方法で SI トレサブルなミリ波帯周波数が合成できる。表3に、周波数チェーンを用いたミリ波発生系の先行研究を示す。

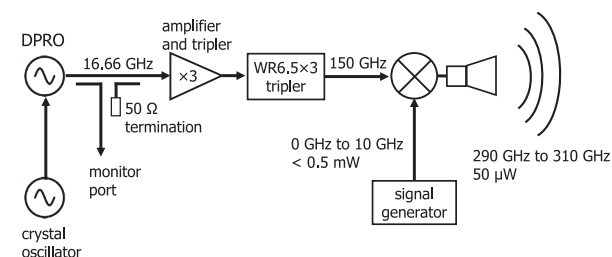


図6 周波数チェーンによるミリ波発生系。DPRO: 位相同期誘電体発振器, WR6.5 × 3: Virginia Diodes, Inc 製周波数 3 通倍器。最終段でホーンアンテナからミリ波が出力される。図は出典²³⁾から修正引用

表 3 周波数チェーンによるミリ波発生の先行研究. 表の作成には出典²⁴⁾を参考にした.

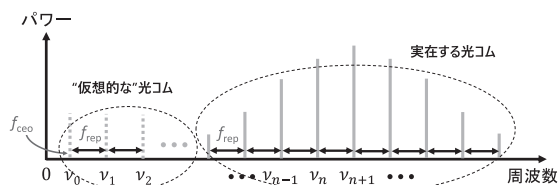
周波数	出典	年
290 GHz to 310 GHz	23)	2008
295.2 GHz ± 1 GHz	25)	2010
625 GHz	26)	2011
339.425 GHz to 340.475 GHz	27)	2014
240 GHz	28)	2015
650 GHz to 680 GHz	29)	2017
~ 220 GHz	30)	2021

3.2 光コムによるミリ波帯周波数合成

10 MHz の基準信号を光コムに用いて SI トレーサブルな光周波数を合成し, 2つの光周波数の差周波発生でミリ波帯周波数を得ることができる. 光コムの出力スペクトルを周波数軸上で見ると, 図 7 (a) に示す通り, 光周波数領域に狭線幅のレーザーモードが等しい周波数間隔で並んでいる. ゼロから始めて n 番目のコムモード周波数 ν_n は,

$$\nu_n = f_{\text{ceo}} + n \cdot f_{\text{rep}} \quad (1)$$

と書ける. ここで, f_{rep} はモード間隔周波数であり, 繰り返し周波数と呼ばれる. 一方 f_{ceo} はキャリアエンベロープオフセット周波数と呼ばれ, コムモードを f_{rep} 間隔で仮想的にゼロまで延ばしたときの「あまり」の周波数である. ここで, 図 7 (b) に示すように, 光コムの f_{rep} および f_{ceo} を, それぞれ UTC に同期した信号発生器からの周波数信号に位相同期することで, 全てのコムモード周波数を SI トレーサブルにすることができる. これら



(a) 光コムのスペクトル

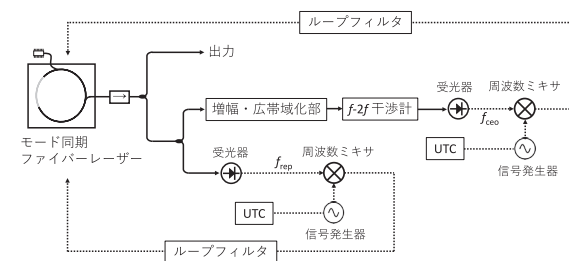
の櫛状の光コムのモード群には 100 GHz 以上離れたモードの組み合わせが多数あるので, 光コムの出力を高速受光器で観察するだけで周波数が f_{rep} の整数倍の信号が検出でき, 受光器の帯域さえ許せばミリ波発生も十分可能である. しかしながら, 我々がよく用いるエルビウム添加光ファイバによる光コムの場合 f_{rep} (および f_{ceo}) が 40 MHz から 300 MHz と低い. そのため, 受光器は所望のミリ波周波数以外に多数の信号を発生してしまい, 受光器の出力の制約から十分な出力のミリ波を得ることができない. そのため, 光コムのモードを用いて効率よく所望の周波数の出力を得る方法が求められる. それには光コムに 2つの連続波発振 (Continuous Wave: CW) レーザーを位相同期する手法と, 光コムのコムモードを抽出・増幅する手法が考えられる. それぞれについて 3.2.1 と 3.2.2 で紹介する.

3.2.1 光コムに CW レーザーを位相同期する手法

2つの CW レーザーの発振周波数を所望の周波数 (ミリ波帯周波数: 100 GHz 以上) だけ離して光コムに位相同期する方法について説明する. 図 8 にこの手法の概要を示す. 図 8 (a) は周波数軸上での概念図であり, 2つの CW レーザーの発振周波数 ν_{laser1} および ν_{laser2} を, 光コムのそれぞれ N_1 番目および N_2 番目のコムモードにオフセットロック (周波数差をつけた位相同期) している. f_{beat1} および f_{beat2} の発生にも UTC に同期した基準信号を用いる. 受光器で発生するミリ波帯周波数 ν_{mmw} は次式で表される.

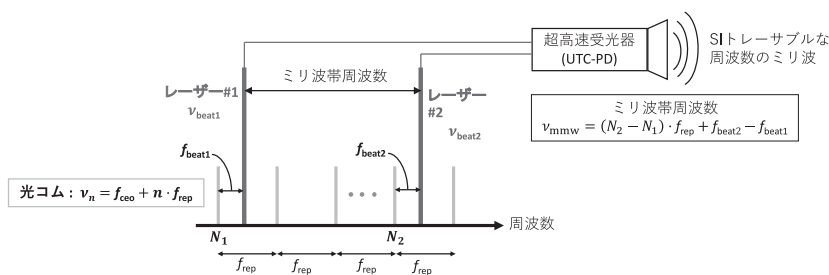
$$\nu_{\text{mmw}} = (N_2 - N_1) \cdot f_{\text{rep}} + f_{\text{beat2}} - f_{\text{beat1}} \quad (2)$$

上式から, 右辺各項が SI トレーサブルな周波数であ

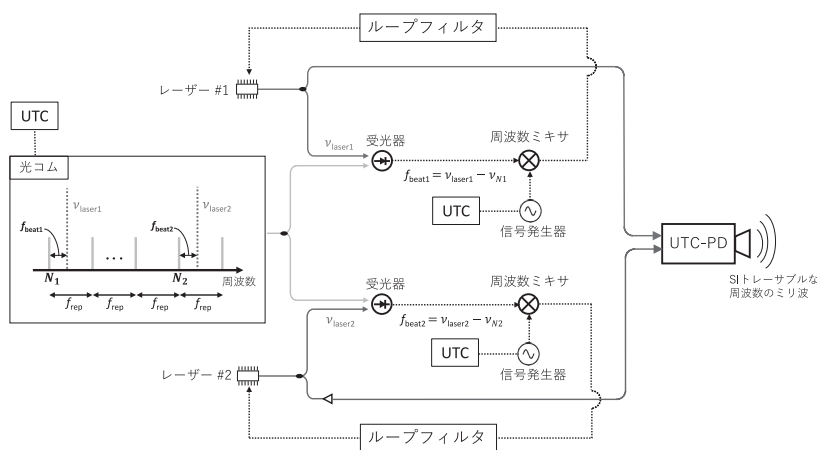


(b) f_{rep} と f_{ceo} の安定化機構. モード同期ファイバーレーザーの出力を, 増幅・広帯域化し, f - $2f$ 干渉計に通すことで f_{ceo} の検出ができる.

図 7 光コムのスペクトル, および周波数安定化機構. UTC: 協定世界時, ν_n : n 番目のコムモードの周波数, f_{rep} : 光コムの繰り返し周波数, f_{ceo} : 光コムのキャリアエンベロープオフセット周波数



(a) 概念図



(b) 実験系概略図

図8 光コムに CW レーザーを位相同期させる手法の概念図, および実験系概略図. UTC: 協定世界時, UTC-PD: 単一走行フォトキャリアダイオード, f_{rep} : 光コムの繰り返し周波数, f_{ceo} : 光コムのキャリアエンベロープオフセット周波数, v_{laser1} : レーザー #1 の周波数, v_{laser2} : レーザー #2 の周波数, f_{beat1} : レーザー #1 と N_1 番目のコムモードの差周波数, f_{beat2} : レーザー #2 と N_2 番目のコムモードの差周波数

ることから, v_{mmw} も SI トレサブルな周波数となることが分かる. 表4は, この手法を用いている先行研究に関し, 光コムのモード間隔, 発生させたミリ波帯周波数, および発表年について示したものである. 出典³¹⁾のみ UTC を基準周波数として用いているが, 他の3つの出典についても UTC を基準とすれば SI トレサブルなミリ波帯周波数の合成が可能である. 超高速受光器とし

ては, レーザー波長が 800 nm 付近の場合^{32),33)}には低温成長ガリウムヒ素 (Low-temperature grown GaAs:LT-GaAs)³⁴⁾が, 波長が 1.5 μm 付近の場合^{31),35)}には単一走行キャリアフォトダイオード (uni-traveling-carrier PD:UTC-PD)³⁶⁾が用いられている. 光コムに2つのレーザーを位相同期する手法の長所としては, 片方の CW レーザーを変調することで差周波であるミリ波の変調が可能であることが挙げられる. レーザー変調は高速化が可能であり, 信号変調に用いることができるだろう.

表4 光コムへの CW レーザーの位相同期によるミリ波発生の先行研究

コムモード間隔 f_{rep}	周波数 v_{mmw}	出典	年
6.25 GHz	99.95 GHz	35)	2004
92.8 MHz	303 GHz	32)	2005
99.79 MHz to 100.2 MHz	813 GHz	33)	2009
50.0 MHz, 51.0 MHz	132.0 GHz	31)	2010

3.2.2 光コムのモードを抜き出す手法

光コムの多数のコムモードから, ミリ波帯周波数だけ離れた2つのモードのみを選択的に抜き出して直接利用する方法について説明する. 図9にその概念図を示す. 光コムの出力を2つに分け, それぞれから N_1 番目のコムモードと N_2 番目のコムモードを抜き出す. これらを超高速受光器に入力することで, 次式で表される周波数

を発生させる。

$$\nu_{\text{mmw}} = (N_2 - N_1) \cdot f_{\text{rep}} \quad (3)$$

この手法を用いた先行研究を表5に示す。いずれも超高

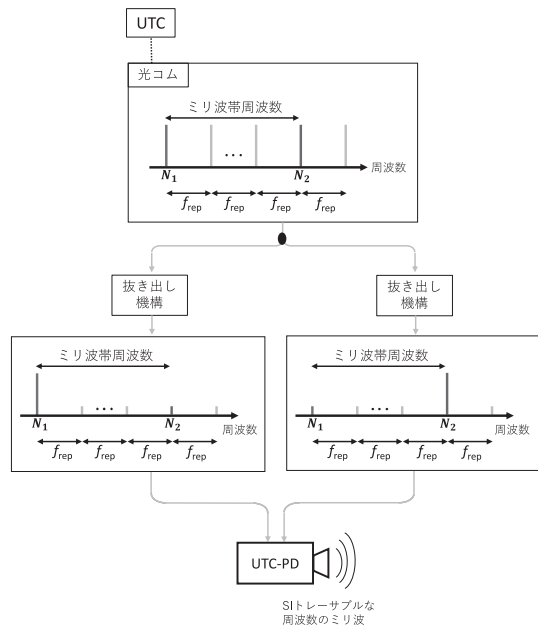


図9 ミリ波帯周波数だけ離れた2つの光コムモードを抜き出し、差周波をとることでミリ波を発生させる手法の概念図。UTC: 協定世界時, UTC-PD: 単一走行フォトキャリアダイオード, f_{rep} : 光コムの繰り返し周波数

表5 光コムモードの抜き出しによるミリ波発生技術の先行研究。AWG: 長さの異なる複数の導波路により、入射した光を波長ごとに分けることができる装置⁴⁵⁾。FBG: 光ファイバのコアの屈折率を周期的に変化させることで、特定の波長を反射させる素子⁴⁶⁾。OIL: スレーブレーザーの周波数を、マスターレーザーの周波数に同期する手法。OILによりレーザーの周波数を、微弱な光コムモード一本の周波数に同期することができる⁴⁷⁾。WSS: 入力信号を波長ごとに分離して異なる出力ポートに接続する機能を持つ素子⁴⁸⁾。FBA: 誘導ブリルアン散乱とは、光ファイバ等の非線形媒質に入力した光が、音響フォノンとの相互作用により散乱される現象。このとき、散乱光の周波数は音響フォノンの周波数だけ低い方にシフトする。増幅したい信号光の周波数を ν_{sig} 、音響フォノンの周波数を ν_{B} とし、周波数 $\nu_{\text{sig}} + \nu_{\text{B}}$ の光をポンプ光として用いることで、誘導ブリルアン散乱により信号光を増幅することができる (ファイバブリルアン増幅)⁴³⁾。

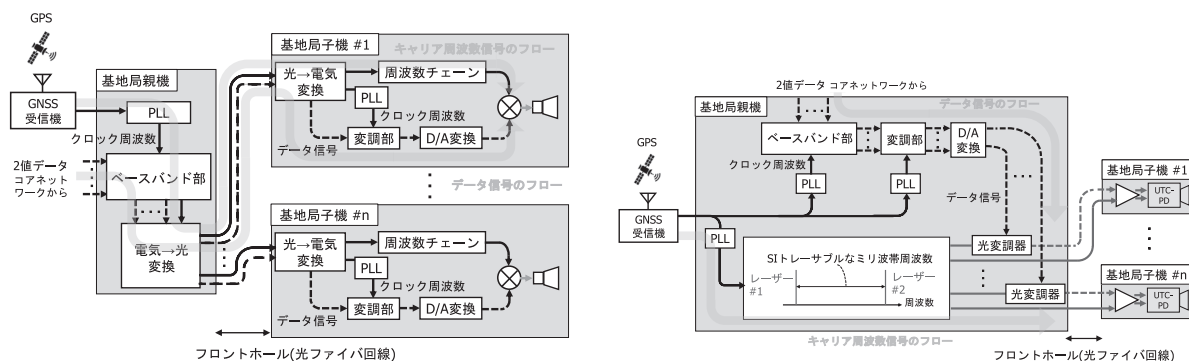
コムモード間隔 f_{rep}	抜き出し機構	周波数 ν_{mmw}	出典	年
30 GHz to 40 GHz	Fiber Bragg Grating(FBG)	270 GHz to 360 GHz	37)	2002
10 GHz, 15 GHz, 17.5 GHz	Optical Injection Locking(OIL) of a laser diode	10 GHz to 110 GHz	39)	2003
60 GHz	Arrayed-Waveguide Grating(AWG)	120 GHz	38)	2004
75 MHz	Fiber Brillouin Amplifier(FBA)	100 GHz	42)	2013
100 MHz	Fiber Brillouin Amplifier(FBA)	100 GHz	43)	2013
12.5 GHz	Programmable Optical Filter	237.5 GHz	49)	2013
17 GHz, 12.5 GHz	Wavelength Selective Switch(WSS)	187 GHz, 200 GHz	40)	2015
25 GHz	Programmable WSS	425 GHz	41)	2017

速受光器としては UTC-PD を採用している。また、出典³⁷⁾⁻⁴¹⁾は、コムモード間隔 f_{rep} が数 10 GHz と広い光変調器型の光コムを用いているため、光バンドパスフィルタによりコムモード一本を抜き出すことが可能である。これに対して、出典^{42),43)}で用いているモード同期ファイバコムはモード間隔が数 10 MHz と狭く、同様の光フィルタではコムモード一本の抜き出しができない。ファイバブリルアン増幅 (FBA) を用いる場合、増幅可能な周波数帯域は 10 MHz 程度であることから⁴⁴⁾、モード同期ファイバコムの特定の一本のコムモードだけが選択的に取り出せる。

3.3 周波数チェーンに対する光コムの利点

光コムの利点について、通信電波 (電磁波) を発信する基地局送信部 (Transmitter:Tx) の構成の観点から説明する^{50),51)}。図10は、周波数チェーンまたは光コムを用いた 6G 基地局送信部として筆者が予想する構成を示す。6G でも 5G 同様、基地局親機と子機が分離し、一台の親機が複数の子機と光ファイバ回線で接続される集中型無線アクセスネットワーク (Centralised Radio Access Network:C-RAN) と呼ばれる構造になると予想した。これは近年、子機の数が増え様々な場所に設置されるようになったことで登場したもので、親機と子機の間はフロントホールと呼ばれる¹⁾。

図10 (a) は周波数チェーンを用いた基地局送信部構成である。親機では、GPS から UTC に基づいた基準周



(a) 周波数チェーンを用いた基地局構成: 基地局子機の周波数チェーンでミリ波帯のキャリア周波数を合成する。

(b) ミリ波帯だけ離れた2つの光はいずれも1.5 μm帯だが、低周波側の光を赤色で、高周波側の光を青色で描いている。

図10 6G 基地局送信部の構成案. フロントホール: 基地局親機と子機を結ぶ回線, PLL: 位同期ループ, D/A変換: デジタル信号からアナログ信号への変換部, GPS: 全地球測位システム, GNSS: 全地球航行衛星システム. なお, 周波数信号のフローは点線で, データ信号のフローは実線で描いている.

波数を受信し, これをもとにクロック周波数を合成する. ベースバンド部では, クロック周波数に基づいてデータ信号を生成する. そして, データ信号と基準周波数信号を光に変換し, 光ファイバ回線を経由させて各基地局子機に送る. 子機ではこれらを再び電気信号に戻したのち, 周波数チェーンを用いて基準周波数からミリ波帯周波数を合成する. さらに, 周波数ミキサを用いて, ミリ波にデータ信号で変調をかけ無線信号を得る.

一方, 図10 (b) は光コムを用いた基地局送信部として予想される構成である. 親機では, UTCに基づいた基準周波数からクロック周波数を合成し, それを用いてデータ信号を生成する. さらに, 3.2.1や3.2.2で述べた光コムを用いた方法で, SIトレーサブルなミリ波帯周波数だけ離れた2つの光周波数を合成する. このうちの片方にデータ信号で変調をかけ, 光ファイバ回線を介して各子機まで運ぶ. 子機ではUTC-PDを用いて差周波信号(ビート)を検出することで, データ変調されたミリ波を発生させる.

周波数チェーンと光コム(図10 (a) と (b))の構造を比較する. 周波数チェーンでは, 親機の最終段で電気/光変換を行った後, 光ファイバで光を伝播し, 子機初段で光/電気変換を行う必要がある. また, 各子機にミリ波帯出力の周波数チェーンが必要である. これは, 親機でミリ波を合成しても, それを電気/光変換できないからである. 一方光コムでは, 親機でミリ波帯周波数だけ離れた2つのCWレーザー周波数を合成する. これらは光ファイバでの伝送が可能なので, 子機では増幅して高速受光器で検出するだけで良い. 従って, 光コムを用

いと, 周波数チェーンを用いた基地局と比べて子機の構造をシンプルにできる. 6Gでは基地局子機の数に大幅に増やす必要があるとされており⁵²⁾, 子機の小型化・低価格化が可能であり, かつ周波数精度の高い光コムを用いた手法は有力である. このような基地局-端末間の無線通信だけでなく, 基地局同士の無線通信に対しても光ファイバ回線と親和性が高い光を用いたミリ波発生法は有力と言われている^{17),53)}.

4. まとめと今後の展望

本調査研究では, 次世代の6Gで必要となるSIトレーサブルなミリ波帯周波数合成法について先行研究の調査を行った. 光コムを用いた手法が, 光ファイバネットワークと親和性が良く, 有力な方法であることを確認した. 一方で, レーザーを光コムに位同期する機構や, 数10 MHzから数100 MHz程度の狭いモード間隔のコムからモード1本を抜き出す機構が複雑であることが実用化に向けた課題であり, より簡便な手法の開発が待たれる.

謝辞

本調査研究遂行にあたり, 光周波数計測研究グループの稲場肇グループ長, およびグループ員の皆様に直接ご指導をいただきました. また, 福田大治首席研究員, 時間標準研究グループの安田正美グループ長, 国際計量室の黒川悟室長, 電磁界標準研究グループの館谷充隆主任

研究員に貴重なご助言をいただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 藤岡雅宣. いちばんやさしい5Gの教本 人気講師が教える新しい移動通信システムのすべて. インプレス社 (2020).
- 2) C. E. Shannon. *Proceedings of the IRE*, 37, 10 (1949).
- 3) 総務省. 令和2年情報通信白書. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/02honpen.pdf> (2020).
- 4) 総務省. Beyond 5G 推進戦略-6G へのロードマップ-. https://www.soumu.go.jp/main_content/000696613.pdf (2020).
- 5) 須山聡. 日本機械学会誌, 125, 10 (2022).
- 6) 総務省. 令和5年情報通信白書. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/pdf/00zentai.pdf> (2023).
- 7) 新井薫, 村上誠. NTT 技術ジャーナル, 44 (2018).
- 8) 中西隆, 坂井勝太, 高田祐, 小倉康夫, 小林正人. NTT 技術ジャーナル, 50 (2017).
- 9) ITU-T. ITU-T G.812 (2004).
- 10) 3GPP. 3GPP TS 25.105 V4.12.0 (2008-12).
- 11) 総務省. 我が国の携帯周波数の割り当てについて. https://www.soumu.go.jp/main_content/000774493.pdf (2021).
- 12) M. A. Lombardi. *NCSLI Measure*, 11, 30 (2016).
- 13) 古野電気株式会社. よくあるご質問 (時刻同期). <https://www.furuno.com/jp/gnss/faq/>.
- 14) 総務省. 高度化された陸上無線システムに対する定期検査のあり方に関する検討会報告書. https://www.soumu.go.jp/main_content/000721770.pdf (2020).
- 15) ITU-R. Radio Regulations, edition of 2020: Volume 1: Article (2020).
- 16) A. J. Seeds, H. Shams, M. J. Fice, and C. C. Renaud. *Journal of Lightwave Technology*, 33, 579 (2015).
- 17) T. Nagatsuma, G. Ducournau, and C. C. Renaud. *Nature Photonics*, 10, 371 (2016).
- 18) T. Kürner, D. M. Mittleman, and T. Nagatsuma. *Springer Nature Switzerland AG*, 531 (2022).
- 19) D. M. Pozar. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons (2011).
- 20) *IEEE Std 802.15.3d-2017 (Amendment to IEEE Std 802.15.3-2016 as amended by IEEE Std 802.15.3e-2017)*, 1-55 (2017).
- 21) FCC. FCC TAKES STEPS TO OPEN SPECTRUM HORIZONS FOR NEW SERVICES AND TECHNOLOGIES. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-356588A1.pdf>.
- 22) 総務相. 総務省告示第百八十一号. https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/spexp/kokuji_r040531.pdf.
- 23) C. Jastrow, K. Münter, R. Piesiewicz, T. Kürner, M. Koch, and T. Kleine-Ostmann. *Electronics Letters*, 44, 1 (2008).
- 24) I. F. Akyildiz, C. Han, Z. Hu, S. Nie, and J. M. Jornet. *IEEE Transactions on Communications*, 70, 4250 (2022).
- 25) C. Jastrow, S. Priebe, B. Spitschan, J. Hartmann, M. Jacob, T. Kürner, T. Schrader, and T. Kleine-Ostmann. *Electronics letters*, 46, 661 (2010).
- 26) L. Moeller, J. Federici, and K. Su. *Electronics letters*, 47, 856 (2011).
- 27) C. Wang, B. Lu, C. Lin, Q. Chen, L. Miao, X. Deng, and J. Zhang. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 4, 75 (2014).
- 28) I. Kallfass, F. Boes, T. Messinger, J. Antes, A. Inam, U. Lewark, A. Tessmann, and R. Henneberger. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36, 221 (2015).
- 29) W. R. Deal, T. Foster, M. B. Wong, M. Dion, K. Leong, X. B. Mei, A. Zamora, G. Altvater, K. Kanemori, L. Christen *et al.*. In *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 233-235. IEEE (2017).
- 30) Y. Feng, B. Zhang, C. Zhi, K. Liu, W. Liu, F. Shen, C. Qiao, J. Zhang, Y. Fan, and X. Yang. *China Communications*, 18, 210 (2021).
- 31) T. Yasui, H. Takahashi, K. Kawamoto, Y. Iwamoto, K. Arai, T. Araki, H. Inaba, and K. Minoshima. *Optics Express*, 19, 4428 (2011).
- 32) Q. Quraishi, M. Griebel, T. Kleine-Ostmann, and R. Bratschitsch. *Optics letters*, 30, 3231 (2005).
- 33) G. Mouret, F. Hindle, A. Cuisset, C. Yang, R. Bocquet, M. Lours, and D. Rovera. *Optics Express*, 17, 22031 (2009).
- 34) E. Brown, F. Smith, and K. McIntosh. *Journal of Applied Physics*, 73, 1480 (1993).
- 35) M. Musha, A. Ueda, M. Horikoshi, K. Nakagawa,

- M. Ishiguro, K. ichi Ueda, and H. Ito. *Optics Communications*, 240, 201 (2004).
- 36) T. Ishibashi and H. Ito. *Journal of Applied Physics*, 127, 031101 (2020).
- 37) T. Yamamoto, H. Takara, and S. Kawanishi. *Electronics Letters*, 38, 795 (2002).
- 38) A. Hirata, H. Togo, N. Shimizu, H. Takahashi, K. Okamoto, and T. Nagatsuma. *IEICE transactions on electronics*, 88, 1458 (2005).
- 39) S. Fukushima, C. Silva, Y. Muramoto, and A. J. Seeds. *Journal of Lightwave Technology*, 21, 3043 (2003).
- 40) H. Shams, T. Shao, M. Fice, P. Anandarajah, C. Renaud, F. Van Dijk, L. P. Barry, and A. J. Seeds. *IEEE Photonics Journal*, 7, 1 (2015).
- 41) X. Pang, S. Jia, O. Ozolins, X. Yu, H. Hu, L. Marccon, P. Guan, F. Da Ros, S. Popov, G. Jacobsen *et al.*. In *Optical Fiber Communication Conference*, Tu3B-5. Optica Publishing Group (2017).
- 42) S. Preußler, N. Wenzel, R.-P. Braun, N. Owschimikow, C. Vogel, A. Deninger, A. Zadok, U. Woggon, and T. Schneider. *Optics express*, 21, 23950 (2013).
- 43) M. Kumagai, S. Nagano, H. Ito, I. Morohashi, Y. Irimajiri, and Y. Hanado. In *2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 1-2. IEEE (2013).
- 44) R. Tkach and A. Chraplyvy. *Optical and quantum electronics*, 21, S105 (1990).
- 45) H. Takahashi, S. Suzuki, K. Kato, and I. Nishi. *Electronics letters*, 26, 87 (1990).
- 46) T. Komukai, K. Tamura, and M. Nakazawa. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9, 934 (1997).
- 47) Z. Liu and R. Slavík. *Journal of Lightwave Technology*, 38, 43 (2020).
- 48) 石井雄三, 大庭直樹, 佐原明夫, and 葉玉恒一. NTT 技術ジャーナル, 21 (2013).
- 49) S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, A. Leuther, A. Tessmann, R. Schmogrow, D. Hillerkuss, R. Palmer *et al.* *Nature photonics*, 7, 977 (2013).
- 50) S. Ummethala, T. Harter, K. Koehnle, Z. Li, S. Muehlbrandt, Y. Kutuvantavida, J. Kemal, P. Marin-Palomo, J. Schaefer, A. Tessmann, S. K. Garlapati, A. Bacher, L. Hahn, M. Walther, T. Zwick, S. Randel, W. Freude, and C. Koos. *Nature Photonics*, 13, 519 (2019).
- 51) T. Nagatsuma and G. Carpintero. *IEICE Transactions on Electronics*, 98, 1060 (2015).
- 52) 日本経済新聞. 「6G」攻防, 韓中が先行 賢い基地局に注目. <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO59847670R00C20A6TJ1000/> (2020).
- 53) A. Kanno, T. Kuri, I. Morohashi, I. Hosako, T. Kawanishi, Y. Yoshida, and K. ichi Kitayama. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36, 180 (2014).