

# 令和 2 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局 電波環境課（室）

評価年月：令和 2 年 9 月

## 1 政策（研究開発名称）

300GHz 帯無線信号の広帯域・高感度測定技術の研究開発<sup>1</sup>

## 2 研究開発の概要等

### （1）研究開発の概要

#### ・実施期間

平成 27 年度～平成 30 年度（4 か年）

#### ・実施主体

民間企業等

#### ・総事業費

1,253.3 百万円

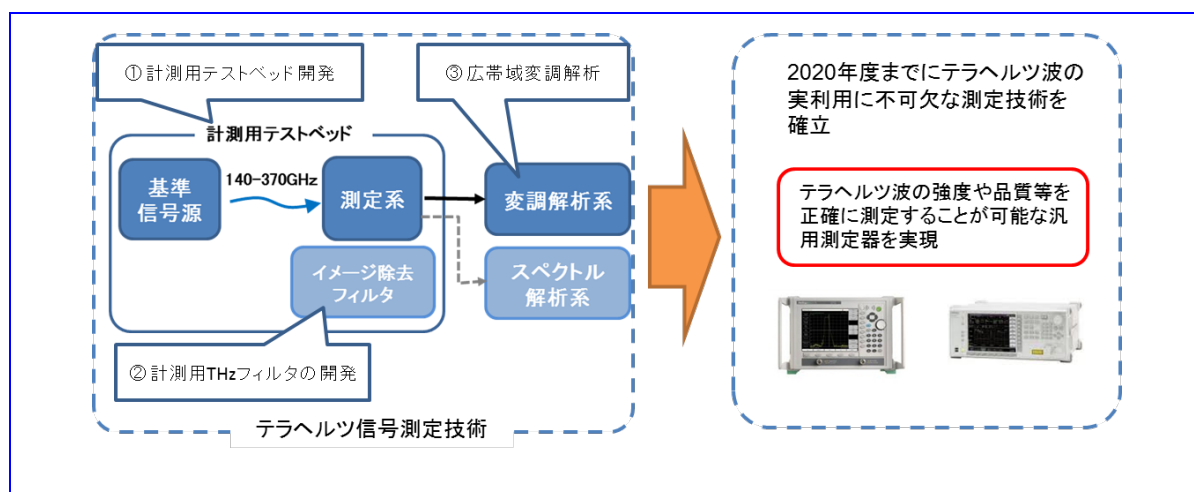
平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	総 額
335.0 百万円	353.0 百万円	325.3 百万円	240.0 百万円	1,253.3 百万円

#### ・概 要

140GHz から 300GHz 帯の送信信号の品質を高精度かつ高効率に評価するために必要な以下の要素技術を確立した。

ア 測定系内で信号を周波数変換する際に生じるイメージ成分を除去し、測定対象のみを抽出する高精度なフィルタの実現及び送信信号の品質を高精度に測定するために必要な測定環境の構築手法を含む送信系計測技術

イ ベースバンド帯域が 15GHz を超える変調信号の信号品質を定量的に評価可能とする広帯域変調解析技術



<sup>1</sup> ・ 事前事業評価は、「テラヘルツ無線信号の広帯域・高感度測定技術の研究開発」の名称により実施。  
・ 新案件名「300GHz 帯無線信号の広帯域・高感度測定技術の研究開発」。平成 27 年予算で開始し、同年度に基本計画書を作成する際に評価会での評価結果を受け名称を変更したもの。

技術の種類	技術の概要
<p>ア 送信系計測技術の開発</p> <p>ア-1) スペクトラム測定系構築技術</p>	<p>周波数帯域 140GHz-300GHz の信号を測定する技術は、高調波ミキサ<sup>2</sup>と既存の汎用測定器（スペクトラムアナライザ）を組み合わせることで実現できるが、変換損失が大きいため、微弱な信号を測定できない。さらに、本来必要な信号以外に複数のイメージ信号<sup>3</sup>成分が発生するため、本来必要な信号に重畳してしまい正しいスペクトラム測定を妨げてしまう問題もある。</p> <p>本研究開発では、基本波ミキシング<sup>4</sup>またはサブハーモニックミキシング<sup>5</sup>を用いた周波数変換を採用することにより、低変換損失でかつ、高調波による不要なイメージ信号成分や、測定系内で発生するスプリアス（不要な周波数応答）信号成分の少ないスペクトラム測定<sup>6</sup>を実現する。さらに、測定系フロントエンドでのミキシングに使用する局部発振信号の信号純度も観測スペクトラムに影響を与えるため、外部の共振回路やフィルタの使用も含めた信号発生方法の検討を行い、低雑音特性を持つ局部発振器を開発する。</p>
<p>ア 送信系計測技術の開発</p> <p>ア-2) 評価用信号発生技術</p>	<p>高感度な送信系計測技術の検証には、送信系計測技術の開発同様、評価用信号の発生技術も重要となる。信号レベルの絶対基準となり、測定帯域内を可変でき、かつスプリアス信号の少ない信号源が必要となるが、構成技術すら確立されていない。</p> <p>本研究開発では、このような信号源を構成し、信号源の周波数特性等を補償する技術、出力信号レベルを校正する技術を開発する。</p>
<p>ア 送信系計測技術の開発</p> <p>ア-3) 高精度フィルタ技術</p>	<p>正確なスペクトラム測定のためには周波数変換で生じる不要な信号を抑圧することが重要である。プリセクタ<sup>7</sup>を使用せずにミキサだけを使用したダウンコンバート処理の場合、ダウンコンバート時にイメージ成分が IF（中間周波数：Intermediate Frequency）信号に混入し、正確なスペクトル測定を実現できない。このため、測定におけるイメージ成分を除去し、測定対象のみを抽出する高精度なフィルタが必要となるが、この周波数帯で適切な市販のフィルタは存在しない。</p> <p>本研究開発では、測定対象のみを抽出する高精度な可変フィルタを実現する。</p>
<p>ア 送信系計測技術の開発</p> <p>ア-4) 高出力半導体アンプ技術</p>	<p>信号レベルの基準となる信号源の電力調整には、300GHz 帯の増幅器の使用が有効である。また、測定系及びそれを評価するための信号源に使用する局部発振信号を、所定の電力レベルまで増幅する増幅器が必要になる。測定器の広ダイナミックレンジ化には、特に局部発振信号の高出力化が求められるため、これらの 150GHz から 300GHz 帯の増幅器を準備する必要がある。</p>
<p>イ 広帯域変調解析技術の開発</p>	<p>モバイルバックホールのように長い通信距離が想定される通信では、雑音耐性の高い QPSK（四位相編移変調：Quadrature Phase Shift Keying）が有力な変調方式の一つと考えられているが、この周波数帯における高効率な広帯域 QPSK 通信技術の開発や運用に必要な信号品質評価のための変調信号解析技術は確立されていない。</p> <p>現状では 20Gbit/s の QPSK 信号の定量評価も困難である。ダウンコンバータを使用することにより、形式的に測定系を構築することは可能であるものの、その測定値には被測定信号の真の特性と測定系の特性が分離されずに含まれ、測定系の周波数特性等を補償しない限り、正しい測定結果を得ることができない。</p> <p>このことから、ミリ波・テラヘルツ波帯の変調信号の信号品質を高精度に評価可能な測</p>

- 2 高調波ミキサ：受信信号と局部発振信号を入力とし、受信信号と、局部発振信号の高調波（整数倍の周波数成分）とを混合（ミキシング）して IF 信号（差周波数または和周波数の信号）を出力する回路。
- 3 イメージ信号：局部発振周波数より IF 周波数だけ離れた上下の周波数のうち、着目する方を IF 信号、他方をイメージ信号と称する。例えば、局部発振周波数より IF 周波数だけ高い成分を IF 信号として利用する場合、IF 周波数だけ低い成分がイメージ信号となる。イメージ信号を受信することにより混信（イメージ妨害）が発生することがある。
- 4 基本波ミキシング：受信信号と局部信号発振器で発生した信号そのもの（基本波）を混合すること。
- 5 サブハーモニックミキシング：高調波ミキシングの中で 4 次程度までの低次のミキシング。例えば、受信信号と、局部発振信号の 4 倍の周波数成分（4 次高調波）とのミキシングを 4 次の高調波ミキシングあるいは 4 次のサブハーモニックミキシングと称する。断りなくサブハーモニックミキシングという場合、2 次の高調波ミキシングを指すことが多い。
- 6 スペクトラム測定：任意の信号について、これを構成する周波数成分を分析する測定方法。また、これを行う装置をスペクトラムアナライザという。
- 7 プリセクタ：受信機等に接続し、IF 信号へのイメージ等の不要信号の混入を避けることにより、特定の周波数の受信感度を向上することを目的としたフィルタ。

定装置の開発は喫緊の課題であるといえる。

QPSK 変調を用いた伝送速度 20Gbit/s の通信を考えると、シンボル速度<sup>8</sup>が 10GSymbol/s となり、信号帯域は最低でも 10GHz となる。現実にはシンボル間の干渉を抑えて高速伝送を実現するためのフィルタ（ナイキストフィルタ）を通すことで信号帯域が 10%以上広がることが多い。さらに、測定装置を実現する上では、信号帯域の外側への漏洩も含めた測定が求められるため、解析帯域幅を 15GHz 程度確保することが必要となる。また、アで実現するフロントエンドと組み合わせることによって、当該周波数帯の信号に対する高精度な変調解析を実現できることが必要である。

以上の実現方策として、例えば、ミリ波・テラヘルツ波帯広帯域変調信号に対応する IF 信号に対して低雑音の量子化と復調を行うことで高精度な EVM<sup>9</sup>測定が可能な変調解析系を構築することが考えられる。また、EVM 測定技術の実現においては、フロントエンドの振幅・位相特性や IQ インバランス<sup>10</sup>等を補償するための技術の確立が求められており、これらの補償が可能な構成を実現する必要がある。

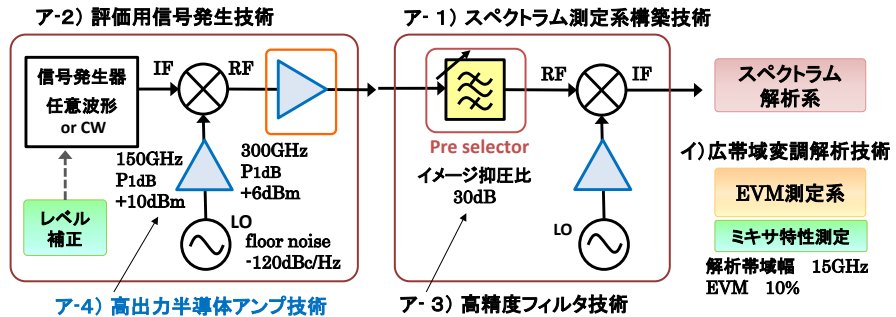


図 1：技術課題の内容と関連

## ・スケジュール

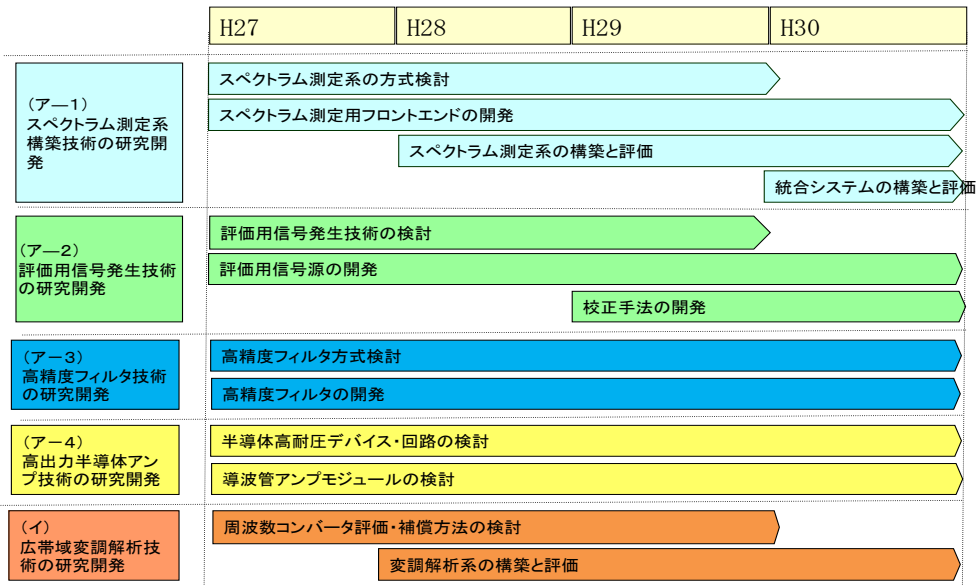


図 2：技術課題の研究開発計画

<sup>8</sup> シンボル速度：1 回の変調で送信できるデジタルデータ（シンボル）の伝送速度。QPSK の場合、2bit で 1 シンボルを構成する。

<sup>9</sup> EVM：エラーベクトル振幅（EVM：Error Vector Magnitude）はデジタル変調信号の品質の指標。デジタル変調信号は、横軸を搬送波と同じ位相、縦軸を搬送波と直交する位相にとったコンスタレーション図上のシンボル位置で表される。この理想的なシンボル位置と復調器により復調（測定）されたシンボル位置とのずれがエラーベクトルで、この大きさと理想シンボル位置の大きさとの比がエラーベクトル振幅（通常%単位で表される）。

<sup>10</sup> IQ インバランス：EVM における、横軸（I 軸）、縦軸（Q 軸）の位相誤差及び振幅誤差。

本研究開発が対象とする周波数の範囲は 140GHz～300GHz であるが、標準導波管は対応する周波数範囲が定められており、単一の標準導波管で対応することはできない。そのため、本研究開発では、表 1 のとおり、周波数の範囲を標準導波管に対応するよう分割し、平成 27、28 年度は 255GHz～315GHz、平成 29 年度は 140GHz～190GHz、平成 30 年度は 185GHz～260GHz を中心に研究開発を実施する（300GHz 帯のスペクトラム測定は計画全体の中で主要な研究開発要素の 1 つであるため、初年度から取り組むこととした）。

表 1：スペクトラム測定系周波数構成

周波数帯 [GHz]	140-190	185-260	255-315
バンド	G 帯	H 帯	J 帯
導波管	WR-5	WR-4	WR-3

## (2) 達成目標

本研究開発では、140GHz から 300GHz 帯を対象として、広帯域なテラヘルツ無線信号の信号品質を定量的に評価するために必要な測定手法、測定環境及び解析技術を確立し、2020 年までに実用化が期待される広帯域なテラヘルツ無線信号の信号品質を定量的に評価するための汎用測定器の実用化、テラヘルツ帯への無線システムの移行に対応する技術基準策定等の円滑な促進などテラヘルツ帯の利用環境の整備を図ることにより、周波数の利用効率の一層の向上に資する。

### ○関連する主要な政策

V. 情報通信 (ICT 政策) 政策 12 「情報通信技術利用環境の整備」

V. 情報通信 (ICT 政策) 政策 13 「電波利用料財源による電波監視等の実施」

### ○政府の基本方針 (閣議決定等)、上位計画・全体計画等

名称 (年月日)	記載内容 (抜粋)
電波有効利用の促進に関する検討会報告書(平成 24 年 12 月 25 日)	<p>第 1 章 電波利用環境の変化に応じた規律の柔軟な見直し</p> <p>1. 電波有効利用を促進する柔軟な無線局の運用</p> <p>(3) 周波数再編の加速</p> <p>② 電波有効利用技術の活用</p> <p>□電波の有効利用を一層推進する観点から、今後は、センサーネットワーク、M2M、テラヘルツ帯デバイス、無人無線航行関連技術など、新たなニーズに対応した無線技術をタイムリーに実現するとともに、電波利用環境を保護するための技術について開発をより一層推進するため、国際標準化、国際展開も含め、成果の実用化に向けた各段階の取組の充実・強化を図ることが必要である。</p> <p>第 3 章 電波利用料の活用の在り方</p> <p>1. 電波利用料の新たな活用分野</p> <p>(1) 検討に当たっての基本認識</p> <p>① 昨今、スマートフォンの急速な普及等により、移動通信トラヒックが前年度比 2 倍以上の割合で増加する等周波数のひっ迫が深刻化していることを踏まえると、電波の有効利用や周波数の移行等に一層強力に取り組み、他の無線システムに割当て可能な周波数を生み出すことや追加的な周波数の割当てを回避することにより、周波数のひっ迫状況を迅速に緩和する対策の必要性が高まっていること</p>

### (3) 目標の達成状況

4年間の研究開発を通じて、140GHz から 300GHz 帯を対象として、広帯域なテラヘルツ無線信号の信号品質を定量的に評価するために必要な測定手法、測定環境及び解析技術を確立するために必要な以下の各要素技術ア及びイを確立した。

- ア 140GHz から 300GHz 帯の信号品質の測定技術及び測定環境構築技術並びに測定系内で生じる周波数変換時のイメージ成分を除去するフィルタの構成技術からなる送信系計測技術。
  - 帯域幅 15GHz 以上で測定可能とする場合の信号解析実験系に使用する局部発振器について、基本計画書における目標値の-120dBc/Hz より優れたフロア雑音特性を達成した。
  - フィルタのイメージ除去比は、基本計画書における目標値の 200GHz において-30dBc 以下（イメージ除去比 30dB 以上）に対して実測値で-60dBc 以下を実現した。
  - 対象無線信号を高精度に測定するための 140GHz から 300GHz 帯に対応した実証システムを実現した。
- イ 140GHz から 300GHz 帯の QPSK 変調信号品質の広帯域変調解析技術。
  - 基本計画書における目標値である、解析帯域幅 15GHz 以上で、エラーベクトル振幅 (EVM) 10%以下を達成した。

なお、基本計画書作成時における既存技術の延長では、解析帯域幅 15GHz 以上においては EVM25%程度と想定され、EVM10%以下の測定精度を実現困難であった。しかしながら、EVM10%以下の測定精度を実現することは、テラヘルツ波無線通信信号の測定器に必要な不可欠な事項であることから、これを目標とした。

上記アとして開発した技術は、対象無線信号を高精度に測定する実証システムに実装し、適切に機能することを確認した。また、上記イとして開発した技術は、広帯域な無線通信の信号品質を高精度かつ高効率に解析できることを確認した。これらにより、広帯域なテラヘルツ無線信号の信号品質を定量的に評価するための汎用測定器の実用化、テラヘルツ帯への無線システムの移行に対応する技術基準策定等に必要な測定技術の確立など、テラヘルツ帯の利用環境の整備に資することを確認し、当初の目標を達成することができた。

技術の種類	目標の達成状況
ア 送信系計測技術の開発  アー1) スペクトラム測定系構築技術	① スペクトラム測定系の方式検討 <ul style="list-style-type: none"> <li>・高感度なスペクトル測定を実現するため、スペクトラム測定系として複数の方式を検討した結果、スペクトラム測定系の主要構成要素であるスペクトラム測定用フロントエンドのミキサには局部発振信号(<math>f_{L0}</math>)の2次高調波成分と RF 信号(<math>f_{RF}</math>)とをミキシングする低変換損失のサブハーモニックミキサを用いた。さらに <math>f_{L0}</math> の周波数をステップ状に切り替える Local 周波数ステップ方式を採用した。(図3)</li> <li>・被測定信号である RF 信号(<math>f_{RF}</math>)、スペクトラム測定系の表示周波数により決定される局部発振信号(<math>f_{L0}</math>)、ミキサにより周波数変換された IF 信号(<math>f_{IF}</math>)の周波数構成を検討し、ミキサ内部で発生する高次のスプリアス成分を図示したスプリアスチャートを元に、複数の固定バンドパスフィルタから構成されるプリセクタの要求仕様を検討し、アー3で開発する高精度フィルタの仕様を決定した。(図4)</li> </ul> ② スペクトラム測定用フロントエンドの開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>・本研究が対象とする周波数範囲 140~300GHz を G 帯/H 帯/J 帯 (表1参</li> </ul>



照)の3つのバンドに区切り、各バンドにおけるスペクトラム測定用フロントエンドを開発した。(図5)

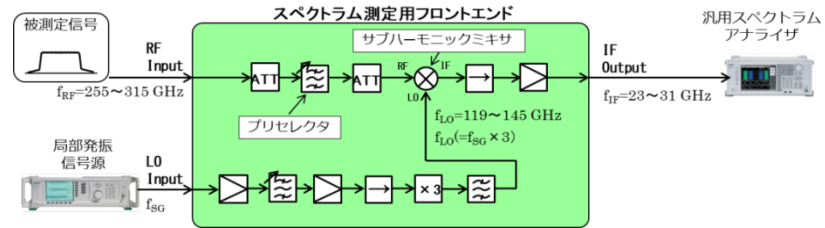


図3：スペクトラム測定系のブロック図 (J帯)

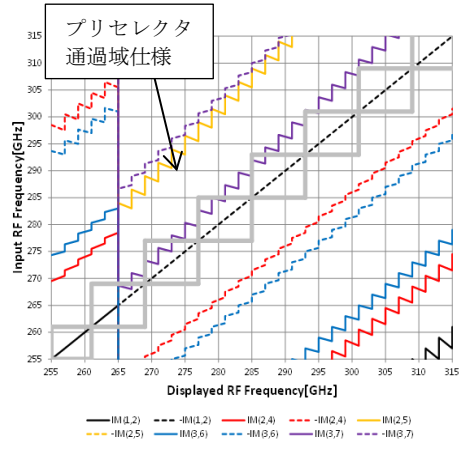


図4：スペクトラム測定系のスプリアスチャート (J帯)



図5：スペクトラム測定用フロントエンド外観 (J帯)

### ③ スペクトラム測定系の構築と評価

- ・スペクトラム測定用フロントエンドと局部発振信号源、汎用スペクトラムアナライザと組み合わせてスペクトラム測定系を構築した。局部発振器のフロア雑音性能は 5MHz オフセット以遠において目標値である-120dBc/Hz 以下を実現した。(図6)
- ・スペクトラム測定系において IF 信号に周波数変換する際にミキサ内で生じる不要なスプリアス成分を除去するため、スペクトラム測定用フロントエンド内にアー3で開発した高精度フィルタ(プリセクタ)を実装することで、スプリアスレスポンス目標値-30dBc 以下(イメージ除去比 30dB 以上)に対して実測値で-60dBc 以下を実現した。(図7)

### ④ 統合システムの構築と評価

- ・H27~H30 年度に構築した G 帯/H 帯/J 帯スペクトラム測定系を組み合わせることで、スペクトラムを空間結合により測定することを目的とした統合システムを構築した。(図8)
- ・各バンドのスペクトラム測定系と被測定物との間の伝搬損失を評価した結果、G 帯/H 帯間の伝搬損失の差異が約 0.3dB、H 帯/J 帯間の伝搬損失の差異が約 1.1dB となり、測定系の設置誤差等から見積もった不確かさ以下であることを確認し、評価系の妥当性を確認した。(図9)

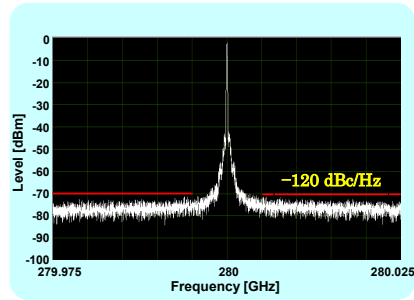


図 6：フロア雑音特性  
(RF 周波数 280GHz, 分解能帯域幅 100kHz 時)

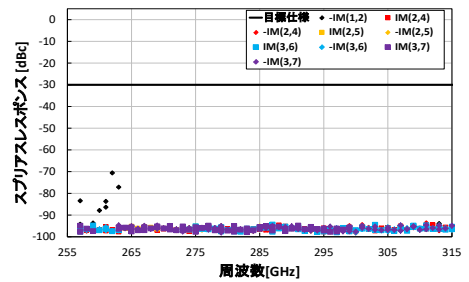
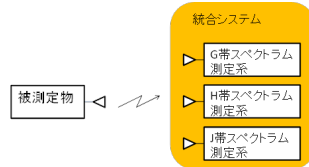


図 7：スプリアスレスポンス特性  
(J 帯, RF 入力信号レベル-15dBm 時)



(a) 統合システム全体構成



(b) 統合システム測定風景  
図 8：統合システム

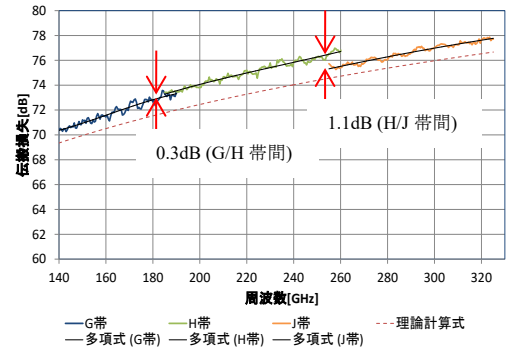


図 9：統合システムの伝搬損失特性

ア 送信系計測  
技術の開発

ア-2) 評価用  
信号発生技術

① 評価用信号発生技術の検討

- 信号レベルの絶対基準となり、スペクトラム測定系を性能評価するために十分なスプリアス性能を有する信号源を検討した。その結果、基準信号源の後段に YIG フィルタ<sup>11</sup>とローパスフィルタ<sup>12</sup>、各通倍器の後段にバンドパスフィルタ<sup>13</sup>を配置し、スプリアスを低減する方式を採用した。さらに出力レベルを確保するため、ア-4 で開発した高出力半導体アンプを組み込み、使用帯域ごとに導波管型スイッチで切り替える方式を採用した。(図 10)

② 評価用信号源の開発

- ア-1 で開発したスペクトラム測定系のレベル校正および性能評価を行う評価用信号源を表 1 に示す周波数帯域ごとに開発した。(図 11)
- 評価用信号源を性能評価し、スペクトラム測定系のレベル校正および性能評価を行うのに十分な出力レベルとスプリアス性能を有することを確認した。(図 12~図 14)

③ 校正手法の開発

- 評価用信号源の校正方法を検討し、国家計量標準器で校正したカロリメータを基準として評価用信号源の出力レベルを校正する方式を

<sup>11</sup> YIG フィルタ：共振器に合成強磁性結晶 YIG (Yttrium Iron Garnet) を用いた、バンドパスフィルタ。

<sup>12</sup> ローパスフィルタ：特定の周波数より低い周波数だけを通過させるフィルタ。

<sup>13</sup> バンドパスフィルタ：特定の周波数帯だけを通過させるフィルタ。

採用した。加えてこの方式における評価用信号源のレベル不確かさを算出した。(表2)

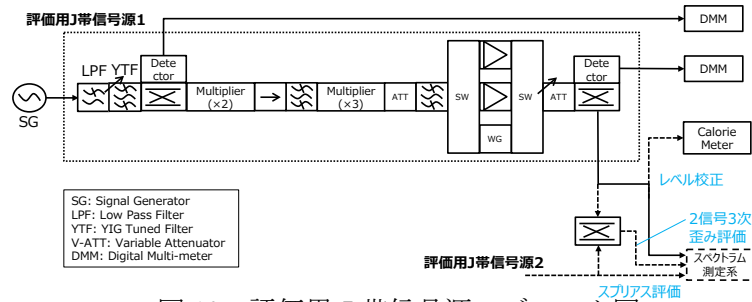


図10：評価用J帯信号源のブロック図

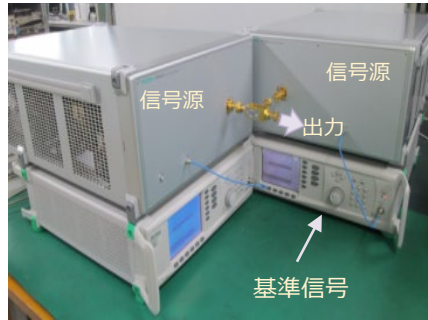


図11：評価用J帯信号源の外観

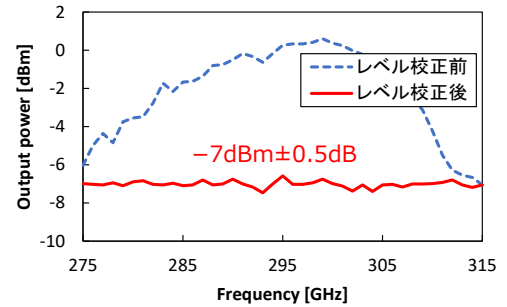


図12：評価用J帯信号源の出力レベル

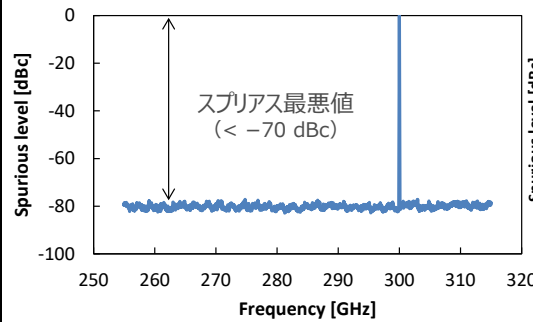


図13：300GHz 出力時のスペクトラム波形

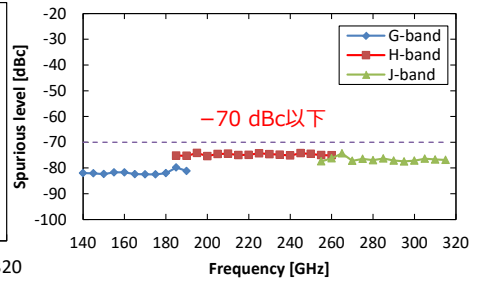


図14：評価用信号源のスプリアス性能

表2：評価用J帯信号源の出力レベル不確かさバジェットシート

不確かさ要因 <sup>①</sup>	タイプ	確率分布 <sup>②</sup>	値 <sup>③</sup> [dB]	除数 <sup>④</sup>	不確かさ [dB]	備考 <sup>⑤</sup>	
カロリメータの校正係数 <sup>⑥</sup>	$u(K_c)$	B <sup>⑦</sup>	正規 <sup>⑧</sup>	0.367	2 <sup>⑨</sup>	0.183	校正証明書に記載された拡張不確かさ <sup>⑩</sup>
信号源とカロリメータの不整合 <sup>⑪</sup>	$u(M_{SC})$	B <sup>⑦</sup>	U字 <sup>⑫</sup>	0.055	$\sqrt{2}$ <sup>⑬</sup>	0.039	評価用信号源とカロリメータの反射係数から算出 <sup>⑭</sup>
カロリメータのレベル精度 <sup>⑮</sup>	$u(P_{cal})$	B <sup>⑦</sup>	矩形 <sup>⑯</sup>	0.274	$\sqrt{3}$ <sup>⑰</sup>	0.158	評価用信号源は出力レベル-7.5 dBmとしてカロリメータのデータシートから算出 <sup>⑱</sup>
カロリメータの周波数特性 <sup>⑲</sup>	$u(P_{cal})$	B <sup>⑦</sup>	矩形 <sup>⑯</sup>	0.165	$\sqrt{3}$ <sup>⑰</sup>	0.095	校正周波数から直線補間して求めた各周波数における校正係数の変化分 <sup>⑳</sup>
導波管の接続再現性 <sup>㉑</sup>	$u(P_{cal})$	A <sup>㉒</sup>	正規 <sup>㉓</sup>	0.015	1 <sup>㉔</sup>	0.015	導波管フランジ10回着脱時における接続再現性の標準偏差 <sup>㉕</sup>
検波器の直線性 <sup>㉖</sup>	$u(P_{cal})$	B <sup>⑦</sup>	矩形 <sup>⑯</sup>	0.071	$\sqrt{3}$ <sup>⑰</sup>	0.041	検波器を値付けするカロリメータのデータシートから算出 <sup>㉗</sup>
検波器の測定ばらつき <sup>㉘</sup>	$u(P_{cal})$	A <sup>㉒</sup>	矩形 <sup>⑯</sup>	0.080	$\sqrt{3}$ <sup>⑰</sup>	0.046	感度が最も低い周波数で検波器での換算出力レベルを10回測定し、算出 <sup>㉙</sup>
合成標準不確かさ						0.27 <sup>㉚</sup>	
拡張不確かさ (k=2) <sup>㉛</sup>						0.54 <sup>㉜</sup>	

ア 送信系計測技術の開発

ア-3) 高精度フィルタ技術

① 高精度フィルタ方式検討

- 高精度フィルタの実現方式として、140GHz 帯で開発実績のある導波管内にファブリペロー共振器を構成する (FPW: Fabry-Perot



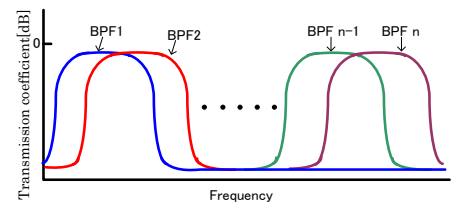
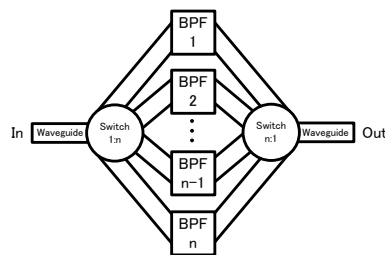
resonator inside Waveguide) チューナブル (周波数可変) フィルタ方式と固定フィルタの切り替えによるフィルタバンク方式を検討し、より挿入損失を低減できるフィルタバンク方式の採用を決定した。

(図 15)

- 従来のフィルタバンクと比べ、構成部品が少なく小型で低損失な特性を実現できる新たなフィルタバンクを開発した。開発したフィルタバンクは、水平可動式の導波管スイッチ内にバンドパスフィルタを内蔵する構成であり、バンドパスフィルタを含む可動部と入出力側の固定部との間に隙間を空けることにより、摩擦による性能劣化を抑制し長寿命化を図っている。また、隙間からの電磁波漏れを防ぐチョーク機構を検討し、広帯域な使用帯域を実現する新たなチョーク機構の開発も行った。(図 16)

② 高精度フィルタの開発

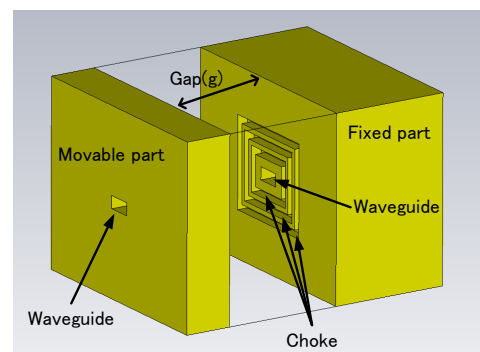
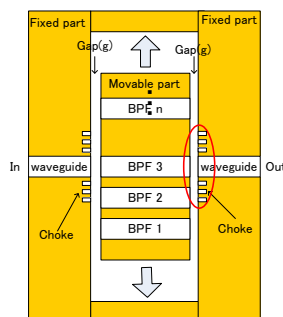
- 高精度フィルタ 2 次試作器である WR-5 帯フィルタバンク (140GHz～190GHz)、高精度フィルタ 3 次試作器である WR-4 帯フィルタバンク (185GHz～260GHz) 及び WR-3 帯フィルタバンク (255GHz～315GHz) の開発を実施した。(図 17)
- 試作器の評価結果より本研究開発の成果目標である、周波数範囲 140GHz ～ 300GHz、イメージ抑圧比 30dB 以上の達成を確認した。(図 18～図 20)



(a) フィルタバンクブロック図

(b) フィルタバンク周波数特性

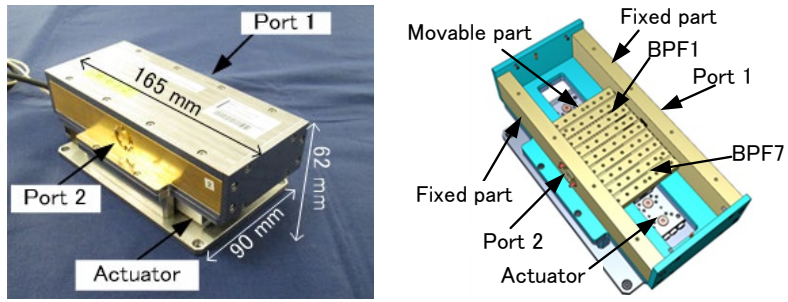
図 15 : フィルタバンク原理図



(a) フィルタバンク断面図

(b) 可動部と固定部の隙間部分拡大図

図 16 : 開発したフィルタバンク



(a) 外観図

(b) 内部イメージ

図 17：高精度フィルタ 2 次試作器（WR-5 帯フィルタバンク）

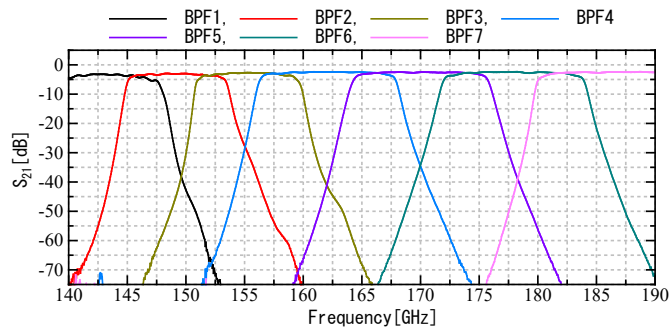


図 18：WR-5 帯フィルタバンク（140GHz～190GHz）測定結果

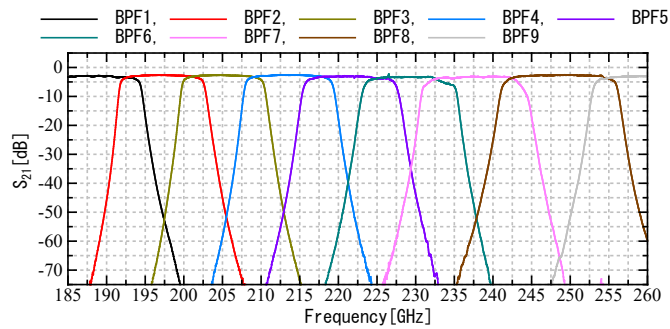


図 19：WR-4 帯フィルタバンク（185GHz～260GHz）測定結果

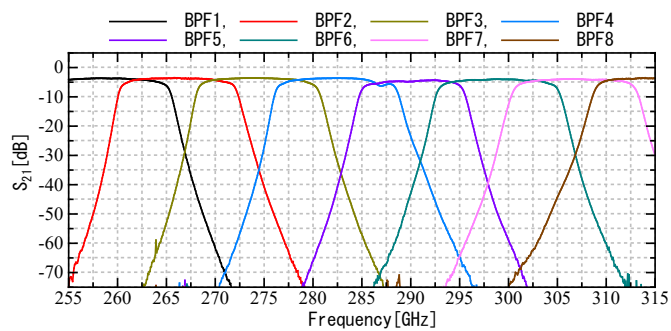


図 20：WR-3 帯フィルタバンク（255GHz～315GHz）測定結果

ア 送信系計測技術の開発  
ア-4) 高出力半導体アンプ技術

① 半導体高耐圧デバイス・回路技術

パワーアンプ（高出力増幅器）高度化のための要素技術として、InP-HEMT<sup>14</sup>製造プロセスの特性再現性および面内均一性の向上にむけた検討を行った。具体的にはゲート電極の形成工程、および 1 層配線形成前

<sup>14</sup> InP-HEMT：インジウム燐（InP）を用いた高電子移動度トランジスタ（HEMT：high electron mobility transistors）

のシリコン酸化膜形成工程を最適化した。この結果、試作毎における再現性を担保しながら、InP-HEMT 特性の面内均一性をこれまでと同等以上とする InP-HEMT 製造プロセスを実現した。また、本研究開発で作製した高速版／高耐圧版 InP-HEMT の長期安定性試験を種々のバイアス条件にて 1000 時間実施し、パワーアンプ応用に向けた InP-HEMT の特性の長期安定性が確保できる動作範囲で確認した。さらに、配線電流容量を向上させるため、基板エッチングレート<sup>15</sup>の累積データとの比較から、エッチング装置<sup>16</sup>の不安定性を検出し、エッチングレートの許容値を設定する手法を導入した。これらの工程管理によって、基板貫通ビア<sup>17</sup>と裏面配線間の電気抵抗を低減して高電流容量化が可能な裏面配線形成プロセスを実現した。

図 21 にパワーアンプ形成裏面の基板貫通ビアおよび高電流容量配線の光学顕微鏡像を示す。工程管理によって基板貫通ビアの形成不良など無く、裏面配線が形成されていることが分かる。電流容量を高く維持できる裏面配線を形成することが可能なエッチング工程管理手法を構築した。

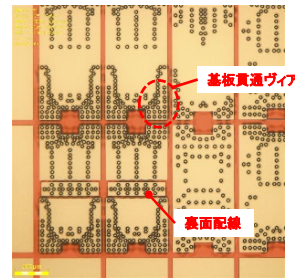


図 21：パワーアンプ回路裏面へ形成した基板貫通ビア及び裏面配線

## ② 導波管アンプモジュール技術

また、150GHz 帯アンプについては、アンプバイアス条件<sup>18</sup>の最適化を行うことにより、高線形バイアス条件を適用し、1dB 利得抑圧点出力 +10dBm を達成した。

図 22 に 150GHz 帯アンプの構成を示す。単位増幅段は、複数段構成のソース接地増幅器<sup>19</sup>で構成され、このうち、入力部側は利得増幅段として領域 A (トランスコンダクタンス<sup>20</sup>の最大値近傍のバイアス領域<sup>21</sup>) に

15 基板エッチングレート：基板をエッチング（食刻。溶液や気体との化学反応などを用いて基板表面を削る成形法）する際の速さ（エッチング深さ／時間）。

16 エッチング装置：基板にエッチングを行う装置。本研究開発においては溶液を用いるウェットエッチングとプラズマ中の反応種を用いるドライエッチングを行うことができる装置を用いた。

17 基板貫通ビア：基板の表裏層を電氣的に接続する（導通させる）ため、基板を貫通した穴に銅メッキ層を形成したものの。

18 アンプバイアス条件：アンプが動作するために必要な直流電圧値。

19 ソース接地増幅器：ソース電極を接地（共通端子に接続）し、ゲート電極を入力端子、負荷抵抗を接続したドレイン電極を出力端子とする増幅回路。HEMT は FET（電界効果トランジスタ）の一種であり、FET はゲート、ソース、ドレインの 3 端子を持つ。

20 トランスコンダクタンス：相互コンダクタンス。ソース接地回路でのゲート電圧変化に対するドレイン電流変化の比率。増幅率に関連する指標で、コンダクタンス（電気抵抗の逆数）と同じ単位を持つ。

21 バイアス領域：トランジスタ等の安定動作が可能なバイアス条件の領域。

バイアスされたトランジスタを用い、出力側は、入力側で大きく増幅された大振幅の高周波信号を線形性高く増幅するための線形増幅段として、領域B（トランスコンダクタンスがなだらかに変化するバイアス領域）にバイアスされたトランジスタを用いている。この、バイアス条件を調整するための回路として、図右下の点線内に示すような抵抗分割型のゲートバイアス回路を用いた。図 23 に 150GHz 帯アンプのチップ(a)とモジュール(b)の写真をそれぞれ示す。導波管モジュール化においては導波管と集積回路を接続するカップリング損失が問題となる。NTTにおいて実績のあるリッジカプラー構造について、300GHz 帯は改良設計、150GHz 帯は新規設計を行った。図 24 に作製した 150GHz 帯パワーアンプモジュールの入出力特性の評価結果を示す。上記の工夫によって、1dB 利得抑圧点出力 (OP1dB) として+10.7dBm が得られた。

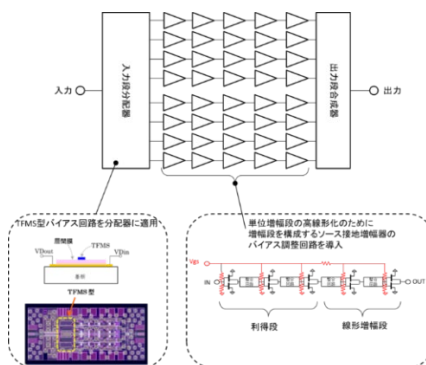


図 22：高線形 150GHz 帯アンプの構成

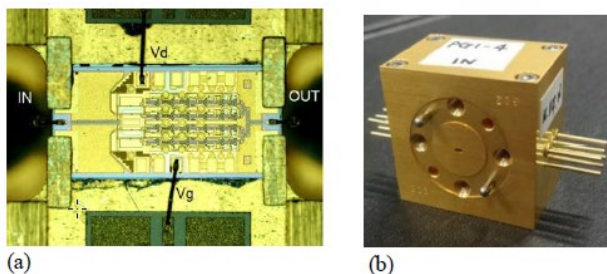


図 23：150GHz 帯アンプのチップ(a)とモジュール(b)

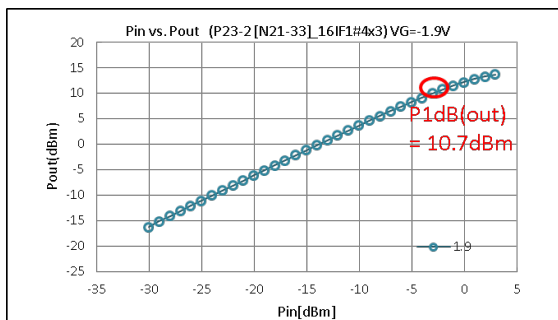


図 24：150GHz 帯アンプの入出力特性

300GHz 帯アンプについては、4 フィンガーFET<sup>22</sup>のデバイスモデルを

<sup>22</sup> 4 フィンガーFET：4つの電界効果トランジスタ（FET：Field effect transistor）を並列接続した構造の素子で、その全体を1つのFETとして動作させる。FETはゲート電極に電圧を加えることでチャネル領域に生じる電界によって電子または正孔の密度を制御し、ソース・ドレイン電極間の電流を制御するトランジスタ。高出力（大電流）を扱うにはチャネル領域を広くする必要があるが、作製時に生じる特性のばらつきを抑えるためにFETを複数に分割し

用いて2フィンガーFET、4フィンガーFETを組み合わせた高線形単位アンプ構造を有する8並列出力構成のパワーアンプを検討した。出力段のコンバイナは低インピーダンス伝送線路の適用により合成損失の低減を図った。本パワーアンプ回路により、1dB利得抑圧点出力+6dBmをモジュールにて達成した。

図25に300GHz帯のアンプの構成を示す6段構成のうち、前段3段は利得段として利得の大きな2フィンガーFETにより構成し、後段3段は線形増幅段として利得は小さいが線形性の高い4フィンガーFETを用いることで、利得・線形性・消費電力のバランスを取った構成とした。図26に作製した300GHz帯パワーアンプモジュールの入出力特性の評価結果を示す。上記の工夫によって、315GHzにおいて、1dB利得抑圧点出力(OP1dB)として+6dBmが得られた。

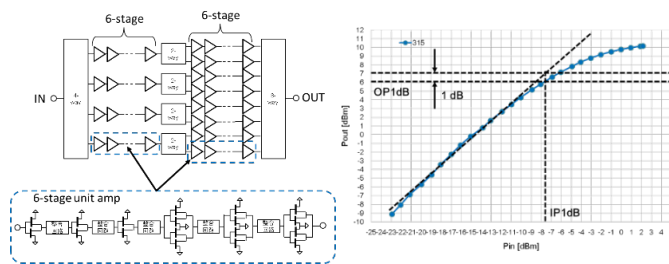


図25：300GHz帯アンプの構成 図26：300GHz帯アンプの入出力特性

イ) 広帯域変調解析技術の開発

① 周波数コンバータ評価・補償方法の検討

- ・ 複数の評価・補償方法について調査・検討し、周波数コンバータの相互性を前提とした複数の方法について検証装置を構築し、周波数コンバータの特性を実測した。その結果、高周波数帯において導波管を用いた周波数コンバータではその機械的制約から前提条件となる相互性を得ることが困難であることを確認した。
- ・ 相互性を前提としない評価・補償方法を検討し、電気光学サンプリング法<sup>23</sup>を用いて直接300GHz帯の信号を測定する方式を採用し、検証装置として、短パルス光源の繰返し周期の高調波に同期させたマルチトーン信号を基準信号として用いる補償パラメータ抽出系<sup>24</sup>を構築した。

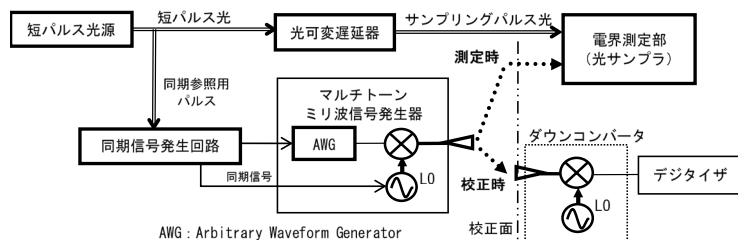


図27：補償パラメータ抽出系ブロックダイアグラム

て並列にした構造が採られる。FETが並列された形状を指になぞらえて、フィンガーと称される。

<sup>23</sup> 電気光学サンプリング法：印加された電界に応じて屈折率が変化する電気光学効果の一つであるポッケルス効果（電界に比例して屈折率が変化する現象）に基づき、サンプリングパルスとして短パルス光を使用することにより、所定の時刻の電界を測定する手法。

<sup>24</sup> 補償パラメータ抽出系：本研究開発において、広帯域変調解析を行うに当たって、周波数コンバータの振幅・位相特性を補償するために用いるパラメータを抽出する系。



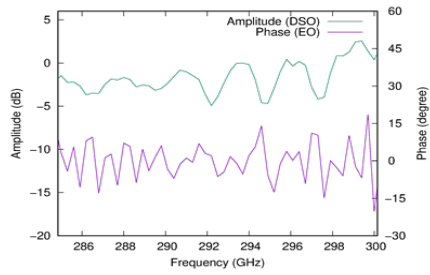


図 30：振幅・位相特性測定結果

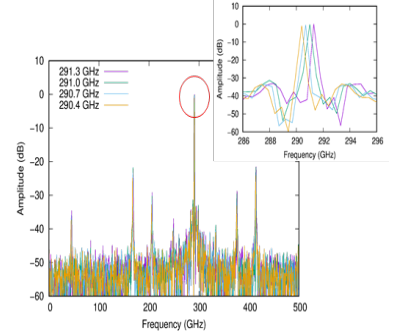


図 29：4 波マルチトーン信号のスペクトラム

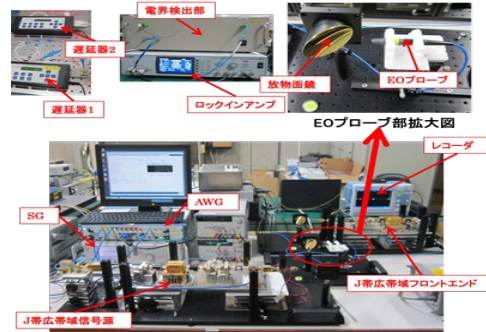


図 28：補償パラメータ抽出系外観

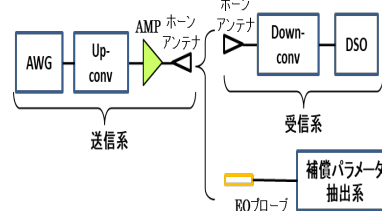


図 31：変調解析系のブロックダイアグラム

② 変調解析系<sup>25</sup>の構築と評価

- 抽出された補償パラメータの検証用途として、J 帯広帯域変調信号源、J 帯広帯域フロントエンド、変調解析系信号処理部と復調・補償用ソフトウェアからなる変調解析系を構築し、中心周波数 307.5GHz、20Gbit/s の QPSK 信号の復調及び EVM 測定を確認した。
- G 帯広帯域フロントエンド及び G 帯広帯域変調信号源を試作し、G 帯に対応した変調解析系を構築し、中心周波数 150GHz、20Gbit/s の QPSK 信号の復調及び EVM 測定を確認した。
- 補償パラメータ抽出系により抽出された補償パラメータの検証のため、変調解析系に補償パラメータを適用し、変調解析系の残留 EVM の評価を

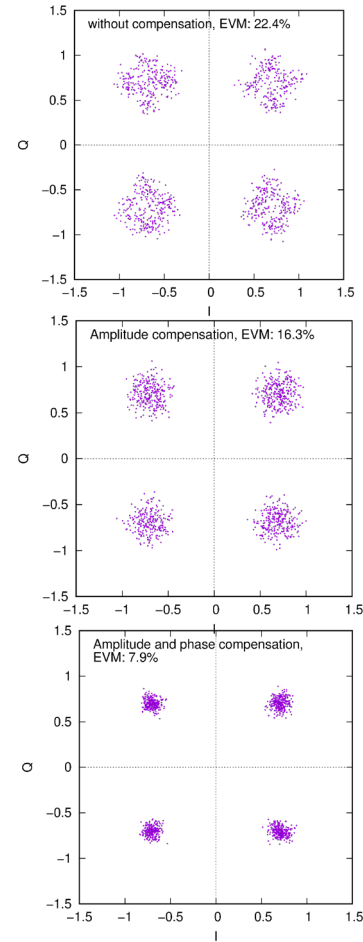


図 32：補償有／無のコンスタレーション比較

(QPSK, fc: 292.5 GHz, 10.2 Gbaud, Roll off: 0.5)

<sup>25</sup> 変調解析系：本研究開発において、送信系において変調された信号を受信・変調解析する系。変調解析に当たっては、補償パラメータ抽出系において抽出した補償パラメータを用いて EVM 改善を行っている。

	実施した。キャリア周波数 292.5GHz、10.2Gbaud、Roll off 0.5 の QPSK 変調信号を送受し、振幅・位相特性測定結果を用いて周波数特性を補償した結果、振幅特性のみを補償すると EVM が 22.4% から 16.3% に改善されるのに対して、振幅・位相特性ともに補償すると更に改善され 7.9% の EVM が確認された。これにより、300GHz 帯 QPSK 信号に対して基本計画書における目標値である EVM10% 以下を達成した。
--	--

### 3 政策効果の把握の手法

本研究開発終了後には、外部専門家・外部有識者から構成される「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年 8 月 28 日）において、目標の達成度、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目処等について外部評価を行い、政策効果の把握を行った。

### 4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表の実績から、各開発技術に関する特許を出願するなど成果展開に必要な技術を実確に確立している。

また、国際電気標準会議（IEC）における 300GHz 帯スペクトラム測定法の国際標準化に向けて、IEC TC103<sup>26</sup>（Transmitting equipment for radiocommunication）WG6 の国内委員会に参加し、標準化に向けた活動を継続。2018 年 10 月、韓国 釜山開催の IEC TC103 国際会合にて、予備技術報告書原案（PreDTR）として提案し承認されるなど、国際標準化に貢献しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

研究開発による成果数及び合計成果数（実績）主な指標	平成 27 年度	平成 28 年度	令和 29 年度	平成 30 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0 件（0 件）	1 件（0 件）	0 件（0 件）	2 件（0 件）	3 件（0 件）
査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）	0 件（0 件）	0 件（0 件）	1 件（1 件）	2 件（2 件）	3 件（3 件）
その他の誌上発表数	0 件（0 件）	0 件（0 件）	1 件（0 件）	2 件（0 件）	3 件（0 件）
口頭発表数	3 件（0 件）	6 件（0 件）	7 件（0 件）	5 件（1 件）	21 件（1 件）
特許出願数	1 件（0 件）	3 件（0 件）	3 件（0 件）	4 件（0 件）	11 件（0 件）
特許取得数	0 件（0 件）	0 件（0 件）	0 件（0 件）	3 件（0 件）	3 件（0 件）
受賞数	0 件（0 件）	0 件（0 件）	0 件（0 件）	1 件（1 件）	1 件（1 件）

注：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。（括弧）内は、その内海外分のみを再掲。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	ミリ波・テラヘルツ波帯の通信に関しては、2020 年頃に 20G-40Gbit/s 程度の実用化が期待されており、情報 KIOSK、モバイルバックホール、データセンター内の通信、スポーツ中継などの 4K/8K 映像コンテンツやリアルタイム遠隔手術現場のケーブルレス化のための高精細画像非圧縮伝送、コンピュータ等の機器内のボード間通信、THz カメラやセンシングなど、様々な形で社会生活に浸透していくこと

<sup>26</sup> IEC TC103：IEC（国際電気標準会議）は電子技術分野の国際標準化活動を行っており、TC103 は IEC 内の 23 の TC（Technical Committee）の 1 つとして無線用送信装置（Transmitting equipment for radiocommunication）に関する標準化を行っている。TC103（幹事国：フランス、議長国：ドイツ）の国内審議団体は（一社）電子情報通信学会である。

	<p>が予想され、また、国際機関等においても、ITU-R WP1A で周波数管理の検討が進められているほか、IEEE 802.15 Study Group 100Gbit/s Wireless においても国際規格化の検討が進められている等、国際標準化に向けた取組が加速している。</p> <p>通信システム間の干渉を避け、ミリ波・テラヘルツ波帯における電波の効率的な利用を実現するためには、厳密な技術基準の策定やその適合性確認のための試験方法の導入が必要であり、広帯域な無線通信の信号品質を、高精度かつ高効率に測定するための測定手法や測定環境、解析技術を確立することが不可欠であった。</p> <p>本研究開発は、無線システムに使用される周波数資源のミリ波・テラヘルツ波帯への移行を促進するための基盤として、140GHz から 300GHz 帯の無線信号を高精度かつ高効率に測定するために必要な技術を実現するための研究開発であり、高度な技術が求められる基礎研究のため民間のみで実施困難であるとともに、ワイヤレスシステムのミリ波・テラヘルツ波帯への移行や周波数の有効利用を促進し、我が国のワイヤレス分野における国際競争力強化を図るため、研究そのものを国が主導して実施する必要があった。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
<p>効率性</p>	<p>本研究開発は、無線システムに使用される周波数資源のミリ波・テラヘルツ波帯への移行を促進するための基盤として、140GHz から 300GHz 帯の無線信号を高精度かつ高効率に測定するために必要な技術を実現するための研究開発であり、その要素技術の開発が必要不可欠であり、他に効率的で質の高い代替手段はない。</p> <p>本研究開発の実施期間中も受託各社の研究代表者・実務者の定期的会合において各社の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成されるアドバイザー委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。</p> <p>また、本研究開発において、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
<p>有効性</p>	<p>スペクトラム測定系構築技術、高精度フィルタ技術及び広帯域変調解析技術を確立し、高出力半導体アンプ、スペクトラム測定系のレベル値付け、スプリアス特性評価、歪特性評価に用いる信号源を実現し、140GHz から 300GHz 帯の広帯域無線信号を対象とした測定環境の構築方法、測定手法および解析技術を確立し、ミリ波・テラヘルツ波帯の通信の信号品質を定量的に評価可能な汎用測定器の実現に寄与することができた。これらにより、140GHz から 300GHz 帯までの未利用周波数帯の無線信号を定量的に評価することが可能となり、汎用測定器の実用化や無線システムの周波数の移行に対応する技術基準策定等の促進などを実現した。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
<p>公平性</p>	<p>本研究開発の成果は、周波数帯のひっ迫解消のための未利用周波数帯の活用に大きく寄与するものであることから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。また、本研究開発は、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査選定することから公平性が認められる。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
<p>優先性</p>	<p>今後急激に深刻化すると予想される移動体通信用周波数のひっ迫の解消のため、高速大容量の通信が可能な高い周波数帯への移行を促進し、数十 Gbps 級の伝送速度の実現が可能である 140GHz 超の周波数帯域で無線システムの導入を可能とするには、当該周波数帯無線信号の高精度測定の実現が必要不可欠である。本研究開発は、その課題を克服するものであり、よって、優先性があったと認められる。</p>

## 5 政策評価の結果（総合評価）

通信システム間の干渉を避け、ミリ波・テラヘルツ波帯における電波の効率的な利用を実現するためには、厳密な技術基準の策定やその適合性確認のための試験方法の導入が必要であり、広帯域な無線通信の信号品質を、高精度かつ高効率に測定するための測定手法や測定環境、解析技術を確立することが不可欠である。本研究開発により、無線システムに使用される周波数資源のミリ波・テラヘルツ波帯への移行を促進するための基盤として、140GHz から 300GHz 帯の無線信号を高精度かつ高効率に測定するために必要な技術を実現することは、ワイヤレスシステムのミリ波・テラヘルツ波帯への

移行や周波数の有効利用を促進するとともに、我が国のワイヤレス分野における国際競争力強化に資する。

本研究開発においてスペクトラム測定系構築技術、高精度フィルタ技術及び広帯域変調解析技術を確立し、高出力半導体アンプ、スペクトラム測定系のレベル値付け、スプリアス特性評価、歪特性評価に用いる信号源を実現し、140GHz から 300GHz 帯の広帯域無線信号を対象とした測定環境の構築方法、測定手法および解析技術実現可能となるため、ミリ波・テラヘルツ波帯の通信の信号品質を定量的に評価可能な汎用測定器の実現に寄与しており、目標を達成することができた。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

本研究開発で確立した技術の普及啓発活動と国際競争力強化のために、引き続き、市場動向にも留意しながら、ミリ波帯無線機器の2次高調波測定に関する技術や 300GHz 帯無線システムの測定技術、試験認証技術の標準化等に向けた活動に努め、実用化を目指す。

## 6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年8月28日）における終了評価において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・ 測定系内で発生するスプリアスを市販のミリ波スペクトラムアナライザと同程度に抑えた140GHz～315GHz スペクトラム測定系（イメージ抑圧比：30dB以上）を実現した。また、高精度な時間波形測定に必要なミキサの周波数特性測定を300GHz帯で実現し、この測定結果によってEVM測定系の周波数特性を補償した変調解析技術（解析帯域幅：15GHz以上、EVM：10%以下）により、EVMが改善することを確認した。要素技術としては高出力半導体アンプモジュール（1dB利得抑圧点出力<sup>27</sup>：+10dBm以上@150GHz，+6dBm以上@300GHz，3dB帯域幅：20GHz以上@150/300GHz<sup>28</sup>）および300GHz帯までの可変フィルタあるいはフィルタバンクを実現した。査読付き論文誌や国際会議等に6件の論文を掲載しており、申請特許も11件ある。
- ・ 代表研究機関及び共同研究機関の実施体制は妥当であり、予算も効率的に使用されたと思われる。
- ・ 目標を一部上回る成果が出ており評価できる。なお、海外測定器メーカーの技術に対する優位性が得られたのかについて、確認が必要である。本来、こうした高周波の高度なアナログ技術は米国と十分に競争できるはずであり、テラヘルツ波の技術の早期立ち上げは国益の点からも重要である。今回所定またはそれ以上の成果が出ており、有益であったと判断できる。

## 7 評価に使用した資料等

- 電波資源拡大のための研究開発の実施・電波利用料による研究開発等の評価に関する会合  
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/>
- 電波有効利用の促進に関する検討会報告書（平成24年12月25日）  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000193002.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000193002.pdf)

<sup>27</sup> 理想的なアンプは入力電力に依存せずに一定の利得（増幅率）を持つが、現実には出力電力は有限であるから、入力電力を増やしていくと、出力電力は飽和し、利得が低下していく。入力電力が十分小さいときの利得（小信号利得）に対して利得が1dB低下するときの出力電力を1dB利得抑圧点出力と称する。

<sup>28</sup> 周波数によっても利得は変化し、周波数軸上で最大利得から-3dB以内の周波数範囲の幅を3dB帯域幅と称する。後半は150GHz帯、300GHz帯について、それぞれ20GHz以上の意味。