電気光学サンプリング法を用いたミリ波位相測定技術

木村幸泰 Yukiyasu Kimura, 森 隆 Takashi Mori, 布施匡章 Masaaki Fuse, 待鳥誠範 Shigenori Mattori

[要]	旨]	モバイルデータトラフィックの増大により,数十 Gbps 級の伝送速度を実現可能なミリ波帯の利用が強く求めら
		れている。しかし,ミリ波帯において想定される広帯域な信号を正確に評価することは困難である。ダウンコン
		バータを使用した測定系では、その測定値に測定系の周波数特性が含まれるため、測定系の周波数特性等
		を校正しない限り, 正確に評価することはできない。特に信号の帯域幅が 10 GHz を超えるような広帯域変調
		信号の EVM 測定等では,ダウンコンバータの振幅特性だけでなく位相特性も校正する必要があると考えられ
		る。我々は、ミリ波帯アップコンバータ単体またはダウンコンバータ単体の位相特性を校正することを目的とし
		て,電気光学サンプリング法を用いてミリ波帯マルチトーン信号を測定する実験を行った。測定速度とS/N比を
		改善した結果, 現実的な測定時間でミリ波 3トーン信号の測定ができる目途が得られた。

1 まえがき

モバイルデータトラフィックは, 飛躍的に増大することが予想され ており, 通信容量の確保は解決すべき課題となっている。この要求 に応えるために, 数十 Gbps 級の伝送速度を実現可能なミリ波・テ ラヘルツ波帯の利用が強く求められている¹⁾。

しかしながら現状では、これらの周波数帯において想定される広 帯域な信号(被測定信号)を正確に評価することは困難である。ダ ウンコンバータを使用することにより、測定系を構築することは可能 であるものの、その測定値にはダウンコンバータの周波数特性等の 測定系の周波数特性が分離されずに含まれる。このため、測定系 の周波数特性等を校正しない限り、被測定信号を正確に評価する ことはできない。特に被測定信号の帯域幅が10 GHzを超えるよう な広帯域変調信号の EVM(Error Vector Magnitude)測定等で は、ダウンコンバータの振幅特性だけでなく位相特性も校正する必 要があると考えられる。

ダウンコンバータ等の周波数変換デバイスの特性評価は、入出 カポートの周波数が異なるためネットワーク・アナライザなどで測定 することが難しい。我々はこれまで、アップコンバータおよびダウン コンバータの位相測定法として、従来から用いられている、ミキサの 相反性を仮定した手法について評価してきた³⁾。しかしながら、ミリ 波帯において、周波数変換デバイスの相反性は高くなく、十分な 測定精度を得ることが困難であった。そこで、アップコンバータ単体、 またはダウンコンバータ単体の位相特性を電気光学サンプリング法²⁾ を用いて測定する手法について検討してきた^{3),5)}。本稿では、電気 光学サンプリング法を用いたミリ波位相測定の原理および実験に ついて説明するとともに、その位相測定精度を向上するために測 定速度と S/N 比の改善を行った結果を示す。

2 位相特性校正方法原理







測定系に用いるダウンコンバータの周波数特性G(f)は、位相特性が既知の基準信号 $X_o(f)$ を用いて、ダウンコンバート後の測定値 $Y_o(f - f_{Lo})$ から式(1)で求める。

$$G(f) = Y_0(f - f_{L0})/X_0(f)$$
(1)

送信信号評価時には、被測定信号X(f)をダウンコンバータに入力したときの測定値 $Y(f - f_{LO})$ とダウンコンバータの周波数特性G(f)から式(2)を用いて校正された測定値X(f)を得る。

$$X(f) = Y(f - f_{L0})/G(f)$$
(2)

ここで,被測定信号として中心周波数 300 GHz,帯域幅 10 GHz の変調信号を校正する場合,同等の帯域を有する基準信号 が必要となるが,このような広帯域ミリ波帯信号の周波数特性を求 めるのは非常に困難である。そこで,ミリ波・テラヘルツ帯の信号を 直接測定可能な電気光学サンプリング法を用いて周波数特性 Xo(f)を測定することを検討した。

3 位相特性測定原理

3.1 電気光学サンプリング法

電気光学サンプリング法は、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に基づいている。 図2に電気光学結晶(Electro-optic crystal:以下, EO 結晶)を用 いた電界検出の構成を示す。EO 結晶へ入射したサンプリングパル ス光(Sampling pulse)が EO 結晶表面の誘電体反射膜(Dielectric mirror)により反射される構成であり、EO 結晶に電界(Electric field)が印加されると屈折率が変化し、反射光の偏波が変化する。こ の反射光の偏波状態の変化を電気信号に変換することにより電界 強度に比例した信号が得られる。そして、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こと が可能となる。



Dielectric mirror

図 2 EO 結晶を用いた電界検出の構成

図 3(a)に電気光学サンプリング法による電気パルス波形測定 ⁶⁾ の構成図を示す。サンプリングパルス光に同期した測定パルス光 (Measurement pulse)からフォトダイオード(Photo-diode)を用いて 電気パルス(Electrical pulse)を生成する。EO 結晶にサンプリング パルス光と電気パルスを入力し,偏光検出器(Polarization Detector)で反射光の偏波の変化を検出する。電気パルスの波形測定は, EO 結晶に入射するサンプリングパルス光と電気パルスの相対的な タイミングを遅延器(Delay Line)で連続的に変化させることによって 実現する。遅延器の遅延量がΔtの場合の電気パルスとサンプリング パルス光およびサンプリングされた信号のタイミングチャート ⁷⁾を図 3(b)に、サンプリングパルス光を遅延器で Δt₁, Δt₂···Δt_n と遅延さ せて測定し波形再生するイメージを図 3(c)に示す。



(a) Configuration diagram



図3 電気光学サンプリング法による電気パルス波形測定

3.2 マルチトーン信号による位相特性測定

前節の電気光学サンプリング法を使用することで電気パルスの 時間波形を測定できるため、この電気パルスをダウンコンバータ校 正用の基準信号として使用することが考えられる。その際、ミリ波帯 の広い周波数帯域を高い分解能で校正するためには、電気パルス のパルス幅を短くすると共に、パルスの繰り返し周期を長くする必 要がある。しかし、ダウンコンバータに許容入力パワー範囲内の電 気短パルスを入力すると、平均パワーが非常に小さくなりすぎて測 定精度が悪化してしまう。この問題を解決するため、測定周波数帯 域のみのマルチトーン信号を使用することで平均パワーが小さくな りすぎないようにした。さらに、測定周波数範囲全体のマルチトーン 信号だと測定周波数範囲が広いと平均パワーが小さくなるため、マ ルチトーン信号を分割して測定し、得られた周波数特性を連結して 測定周波数範囲全体の周波数特性を取得する方式について検討 した。

図4に複数のマルチトーン信号から得られた周波数特性を連結 して測定周波数帯域全体の周波数特性を取得する処理の概念図 を示す。まず,最初に電気光学サンプリング法を用いて周波数間 隔が等間隔な3波以上から構成されるマルチトーン信号の時間波 形を測定し,FFT 処理により周波数特性を算出しマルチトーン信 号間の位相差を算出する。算出後,マルチトーン信号内の2波以 上が重なるように周波数を変更したマルチトーン信号を用いて同様 の処理を繰り返し行い,算出した位相差を連結して測定周波数帯 域全体の位相周波数特性φ(ω)を算出する。

以下,算出した位相差を連結して測定周波数帯域全体の位相 周波数特性 $\varphi(\omega)$ を算出する手段を説明する。図 4(a)において, f, f_2 , f_3 の3波のマルチトーン信号の位相差 $\Delta \varphi_1$, $\Delta \varphi_2$ を測定し, 次に, f_2 , f_3 の3波のマルチトーン信号の位相差 $\Delta \varphi_2$, $\Delta \varphi_3$ を測定して, これ らを連結していく。マルチトーン信号の各正弦波の絶対位相は不 定とすると, $\Delta \varphi_2$ と $\Delta \varphi_2$ は一致しないが, $\Delta \varphi_2 - \Delta \varphi_1$, $\Delta \varphi_3 - \Delta \varphi_2$ とは絶 対位相に依存しないため, $\Delta \varphi_3 = \Delta \varphi_3 - \Delta \varphi_2 + \Delta \varphi_2$ として $\Delta \varphi_1$ の延長と しての Δφ3 を求めることができる。これを図 4(b)に示すように所望 の周波数帯域分繰り返すことで測定周波数全体の位相特性が得ら れる。



図4 マルチトーン信号による周波数特性取得時の位相連結イメージ

4 実験の構成

図 5 に、電気光学サンプリング法を用いたミリ波 3トーン信号測 定の実験構成を示す。同図は、マルチトーン信号生成部、電界測 定部、およびミリ波測定部から構成される。

4.1 マルチトーン信号生成部

ミリ波マルチトーン信号は信号発生部(Signal generator)にお いて任意波形発生器(AWG:Arbitrary waveform generator)で 生成したマイクロ波帯マルチトーン信号をミキサ 1(mixer 1)でアッ プコンバートし,ミリ波帯広帯域アンプで増幅して生成する。

電気光学サンプリング法で測定するにはマルチトーン信号とサン プリングパルス光(Sampling pulse)を同期させる必要があるため, AWG とミキサ 1 のローカル信号発生器(SG)を同期回路 (Synchronous circuit 1, 2)で短パルス光源(Pulse laser)の繰り 返し周期(10 ns)に同期させた。このとき,発生するミリ波帯マルチ トーン信号の位相は、AWG とミキサ1のローカル信号の同期精度 の影響を受ける。例えば, 300 GHz の信号発生時の位相変動を 10°以内に抑える場合,同期周波数を 100 MHz とすると, 3000 分の1の0.0033。以下の同期精度が要求されるが、この精度は フェーズ・ロック・ループ(PLL)に用いる位相比較器では実現が困 難な精度である。そこで短パルス光源の繰り返し周波数(100 MHz)の N 次高調波成分(AWG:2.6 GHz, SG:15 GHz±2.5 GHz)に同期をかけることで、マルチトーン信号の位相変動を低減 するようにした。さらに短パルス光源の繰り返し周波数をルビジウム 発振器(Rb oscillator)に同期させることで繰り返し周波数の変動の 低減を図った。これにより、SG 出力周波数 15 GHz 時の周波数変 動は、±4.5 kHzから±0.45 Hzに低減している。



図5 電気光学サンプリング法を用いたミリ波3トーン信号測定の実験構成

4.2 電界測定部

電界測定部は、生成したマルチトーン信号を電気光学プローブ (EO probe:以下, EO プローブ)と偏光検出器(Polarization Detection Unit)を用いて測定する。EO プローブは偏波保持ファイバの 先端に誘電体反射膜を持つEO 結晶を取り付けた構造となっている。

短パルス光源から出力されたサンプリングパルス光は偏光検出 器を素通りして EO プローブに送られる。EO プローブで電界により 偏光変調を受けたサンプリングパルス光はファイバを逆行し偏光検 出器に入力される。ここで PBS2(Polarizing Beam Splitter 2)で 反射した偏波成分は PD2(Photo Diode 2)に入射し電気信号に変 換される。PBS2 を透過した偏波成分はファラデー回転子(FR: Faraday Rotator)によって偏波が回転して PBS1 で反射し, PD1 に入射し電気信号に変換される。PD1 出力と PD2 出力の差動信 号検出を行うことでレーザー強度雑音などの同相雑音を排除した 測定が可能となる。

偏光検出器の出力信号は微小なのでロックインアンプ(Lock-in Amplifier)を用いて検出する。ロックインアンプは外部から供給されるリファレンスクロック(Reference clock)と同じ周波数成分の検出を行うため、マルチトーン信号をリファレンスクロックで変調させる必要がある。従来はミキサを用いていたため、ミキサの周波数特性の影響を受けていたが、本構成では、AWGの特徴を活かし、AM 変調したマルチトーン信号を直接出力することにより、ミキサの周波数特性の影響を受けないロックイン検出を実現している。上記の測定を可変光遅延器(Optical variable delay)の遅延時間を掃引しながら実行することでマルチトーン信号の時間波形が得られる。

5 測定性能の改善

5.1 測定速度改善

これまでロックインアンプからのデータ取り込みは、可変光遅延 器を所望の位置に移動後、データを読み出す逐次読み出し方式を 採用していた。分解能を1GHz、周波数帯域を500GHzとした場 合、遅延器移動量は1000ps、ステップ1psとなり、1回のデータ 取り込みには約3秒かかるため、マルチトーン信号の測定には約 3000秒の時間を要していた。15GHzの測定帯域幅を3トーン信 号を用いて測定する場合には16回の測定が必要となり、測定時間 は約48000秒となる。さらに分解能の高い測定を実現しようとすると、 現実的な時間での測定は困難となる。そこでロックインアンプの読 み出し方式を逐次読み出しから、遅延量を連続掃引後、一括読み 出しする方式に変更することで、測定速度を改善した。 具体的には遅延器を一定速度で動作させた際のロックインアン プのアナログ出力信号をレコーダ(Recorder)にて連続測定する。こ の場合,分解能1GHz,遅延器の動作(掃引)速度を2ps/sとする と測定時間は500秒となる。遅延器の速度安定化時間などを考慮 し600秒としても,測定時間を5分の1に短縮することができる。

表1に,読み出し方式の違いによる測定性能について比較した 結果を図6にその際得られたスペクトラム波形を示す。同結果は, 308 GHzのCW信号をそれぞれ,逐次読み出し方式と連続掃引 方式で測定解析した際の結果を示している。連続掃引方式の場合 でも、スペクトラム,信号レベル、フロアレベル、S/N比の結果にお いて逐次読み出し方式と同等の性能が得られていることがわかる。 測定時間5分の1で同等のS/N比を実現できたことは、同等の測 定時間でS/N比を7dB程度改善することに相当する。測定性能 の評価指標として単位時間当たりのS/N比を算出すると、-4.51 dBから2.84 dBへ改善されたことになる。

表 1	ロックインアン	プ読み出し	方式比較(C	W: 308	GHz)
-----	---------	-------	--------	--------	------

	信号 レベル [dB]	フロア レベル [dB]	S/N [dB]	測定時間 [s]	単位時間 当たりの S/N 比 [dB]
逐次読み出し	-142.66	-173.02	30.36	3070	-4.51
連続掃引	-141.63	-172.25	30.62	600	2.84



図6 ロックインアンプ読み出し方式ごとのスペクトラム比較結果

5.2 遅延器の微分直線性の補正

遅延器を掃引して波形測定を行う際, 掃引速度偏差が測定周波 数ずれの要因となる。また, 遅延器の微分直線性が周波数変動の 要因となる。このため, 遅延器の掃引速度偏差および微分直線性 の補正が必要となる。そこで, 掃引速度偏差および遅延器の微分 直線性を CW 信号を複数回測定したときの時間波形と, 理論値と の差から算出し補正に適用した。CW 信号における遅延器補正の 有無による測定結果を**表 2** に, スペクトラムを図**7** に示す。

	信号 レベル [dB]	フロア レベル [dB]	S/N [dB]	測定 時間 [s]	単位時間 当たりの S/N 比 [dB]
補正なし	-141.63	-172.25	30.62	600	2.84
補正有	-138.96	-172.21	33.25	600	5.47

表 2 遅延器補正比較(CW: 308 GHz)



図7 遅延器補正スペクトラム比較

遅延器補正を行うことで S/N 比が 2.63 dB 改善された。フロアレベルの差は 0.04 dB なのでピークレベルが遅延器補正により改善されたことがわかる。これは、遅延器の微分直線性により、周波数 領域で拡散されていた信号成分が、中心周波数に収束したためと 考えられ、スペクトラムが鋭くなっていることからも確認できる。

5.3 S/N 比の改善

位相測定精度の向上には S/N 比の改善が必要である。ノイズの 影響が少ない測定を実現するためロックインアンプのリファレンスク ロック周波数の見直しを行った。図8に偏光検出器のPD 出力ノイ ズ特性を示す。この特性によると300 kHz あたりまで比較的大きな ノイズが見られ、それ以降は緩やかに減少している。使用している ロックインアンプは、リファレンスクロックの上限周波数が3 MHz で あるため、300 kHz から3 MHz の間のなるべく高い周波数を選択 することで、ノイズの影響が少ない測定が可能となる。表3 にリファ レンスクロックを 20 kHz から 2.5 MHz に見直したときの測定結果 を図9 にその際得られたスペクトラム波形を示す。同結果からリファ レンスクロックを 2.5 MHz とすることでフロアレベルが改善し S/N 比 を 11.5 dB 改善できた。





表3 リファレンスクロック比較(CW: 308 GHz)

リファレンス クロック周波数 [MHz]	信号 レベル [dB]	フロア レベル [dB]	S/N [dB]	測定 時間 [s]	単位時間 当たりの S/N 比 [dB]
0.020	-138.96	-172.21	33.25	600	5.47
2.5	-139.80	-184.55	44.75	600	16.97





以上の結果から,連続掃引による測定時間の高速化および遅延 器掃引速度補正と併せると,測定性能の評価指標である単位時間 当たりの S/N 比を約 21 dB 改善した。

6 むすび

ミリ波帯周波数コンバータの位相特性測定技術として、電気光学 サンプリング法を用いたミリ波 3 トーン信号の位相測定の原理およ び実験の構成について説明するとともに、位相測定精度向上のた めに測定速度と S/N 比の改善を行った。その結果、15 GHz 帯域 幅の測定時間は 48000 秒から 9600 秒に、S/N 比は 30.36 dB か ら 44.75 dB に改善された。測定性能の評価指標である単位時間 当たりの S/N 比は-4.51 dB から 16.97 dB に改善され、現実的な 測定時間でミリ波 3 トーン信号の測定ができる目途が得られた。

謝辞

本研究開発は総務省「電波資源拡大のための研究開発」の支援 の下に実施したものである。貴重なご意見・ご議論をいただいた本 研究開発の運営委員各位に深謝致します。

参考文献

- 永妻忠夫, "実用化に向けて加速するテラヘルツ技術", 電子情報通 信学会誌, vol. 97, No. 11, pp. 918-923, Nov. 2014.
- D Williams, P Hale, K Remley, "The Sampling Oscilloscope as a Microwave Instrument", IEEE Microwave Magazine, pp. 59-68, Aug. 2007.
- 木村幸泰, 布施匡章, 待鳥誠範, 森 隆, "電気光学サンプリング法に よるミリ波ダウンコンバータの位相校正システムの検討", 電気学会研 究会資料 光応用・視覚 計測合同研究会, IEE Japan, LAV-17-009 IM-17-009, pp. 49-54, 2017.
- 4) 木村幸泰, 布施匡章, 待鳥誠範, 森 隆, "電気光学サンプリング法を 用いたミリ波ダウンコンバータの位相校正システムによる振幅特性評 価", 電気学会研究会資料 光応用・視覚 計測合同研究会, IEE Japan, LAV-18-009 IM-18-009, pp. 41-45, 2018.
- 5) 木村幸泰, 布施匡章, 待鳥誠範, 森 隆, "電気光学サンプリング法に よるテラヘルツ波ダウンコンバータの位相校正法の検討", 電子情報通 信学会 総合大会 依頼シンポジウム BCI-1-7 2018.
- D.F. Williams, P.D. Hale, T.S. Clement, and J.M. Morgan, "Mismatch corrections for electro-optic sampling systems", in Automatic RF Techniques Group Conf. Dig., vol. 56, pp. 141– 145, Nov. 2000.
- 7) 安井武史, "テラヘルツ時間領域分光の高速化", 平成19年度分光学 会テラヘルツ分光部会シンポジウム「テラヘルツ分光法の最先端 II ~多様化と進歩~」, Nov. 2007.

執筆者



木村幸泰 技術本部 先進技術開発センター データ分析チーム

隆





技術本部

森

布 施 匡 章 技術本部 先進技術開発センター データ分析チーム



待 鳥 誠 範 技術本部 先進技術開発センター センシング技術チーム