

論文の内容の要旨

氏名：菅野 翔太

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：アンダーサンプリングを用いた QPSK 変調信号評価法に関する研究

スマートフォンやタブレット端末の普及により、ゲームや高画質な動画のストリーミング再生といったリッチコンテンツや SNS (Social Network Service) などのアクセス頻度の高いサービスが多く利用されるようになった。また、自動車の自動運転やスマート家電など従来よりも多くの機器がインターネットに接続するようになった。さらに、遠隔医療技術など低遅延の通信を必要とする技術が増えている。これらの需要により、大容量・大規模接続・低遅延の新しい無線通信技術の必要性が高くなっている。

従来の無線通信技術で利用されていた周波数領域では伝送帯域に限界があることに加えて低遅延伝送、大規模接続といった新しい無線通信技術の利点を目的として、これまでの無線通信技術ではあまり用いられていなかったミリ波帯などの高周波数領域を利用した高周波数広帯域の無線通信技術の開発が活発になっている。たとえば、第 5 世代無線通信では 3.6~4.9GHz と 28GHz の周波数を利用する。また、次世代の無線通信技術に向けて 300GHz 帯を利用した無線通信技術の開発が進められている。次世代の無線通信技術開発の一環で、総務省は 140GHz から 300GHz 帯の QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 変調信号の品質を解析帯域幅 15GHz 以上で評価できる無線通信評価システムの開発を計画している。

これに伴い、高周波数広帯域の無線通信を測定評価する技術が必要とされている。無線通信評価では BER (Bit Error Rate) を計測する方法と波形から EVM (Error Vector Magnitude) 等の値を測定する方法がある。

BER の測定は実際に無線通信システムを用いて受信したテストパターンのうち、誤った情報として受信した割合を計測する方法である。無線通信システムの性能を評価するためには最も良い方法であるものの、テストパターンは連続して全てのデータを受信する必要があり、1 週間以上の測定時間がかかるうえに、実際の無線通信で受信する不連続な信号の評価はできない。

これに対して、EVM の計測は、理想的なシンボル値と測定された無線信号の同相成分 (I : In-Phase) と直交成分 (Q : Quadrature) から得られるシンボル値との距離を測定する方法である。EVM の計測では、BER 計測は全てのテストパターンを測定する必要があったのに対して、非常に少ない点数で迅速な測定ができ、実際の無線通信で受信する不連続な信号であっても評価できる。

また、BER の計測結果は、無線通信にエラーが生じたことは示すものの、エラーの原因を識別することはできない。これに対して、EVM の計測結果は、測定された波形や EVM が復調信号の振幅および位相軌跡に影響を与える信号劣化に対して敏感に反応するため、無線通信の問題の原因を明らかにできる。したがって、デジタル無線通信システムでは EVM の測定が最も広く用いられる変調品質の測定基準となっている。

EVM の測定では、現在は ADC (Analog to Digital Converter) を用いてアナログ値からデジタル値に変換して測定する方法が一般的である。高周波数広帯域の無線通信評価では、たとえば、総務省の計画ではキャリア信号の周波数が 140GHz~300GHz になる。ナイキストの定理に従えば、600GHz よりも高いサンプリング周波数が必要となる。このため、無線信号をこれまでの技術を用いて直接 ADC によって測定することはできない。直接、無線信号を測定しない無線通信評価の方法として、アナログ回路によって無線信号を復調した後に、 I 成分と Q 成分を測定する方法が考えられる。しかしながら、この方法では 140GHz~300GHz のキャリア周波数の成分は除去されるものの、被測定信号の I 成分と Q 成分は、前述したようにベースバンドである 15GHz 程度までの周波数成分を含む。したがって、30GHz より高いサンプリング周波数が必要となり、現在の ADC の性能では、 I 成分と Q 成分であっても容易に測定できない。

そこで、被測定信号の周波数よりも低いサンプリング周波数で測定するアンダーサンプリング技術を無線通信評価に応用することを提案する。特に、アンダーサンプリング技術は正弦波のような周期

的な信号の測定に用いられることが一般的であり、情報信号によってランダムに変化する I 成分と Q 成分の測定に用いられてこなかったが、情報信号の 0 と 1 が変化するタイミングであるシンボルレートが I 成分と Q 成分の周波数に比べて一定であることを利用する新しい概念を用いたアンダーサンプリングによる測定を提案する。また、アンダーサンプリングによる測定では I 成分と Q 成分の時間波形は、シンボルの変化するタイミングを基準として、リアルタイムサンプリングで測定された時間波形が重ね合わされたような波形として測定される。これにより、無線信号のキャリア信号の周波数と復調器の局部発振器の周波数の差を補正する場合、従来の方法では補正することができない。そこで、アンダーサンプリングによる無線通信評価に適した新しい周波数差の補正方法を加えて提案する。提案する周波数差の補正方法では、 I 成分と Q 成分から直線的な位相を計算するために、 I 成分と Q 成分の位相を 2 倍角の公式を用いて 4 倍する。これにより、情報信号による位相の変化をキャンセルすることができるので、位相を 4 倍した I 成分と Q 成分からは直線的な位相を計算することができる。

本論文では、リアルタイムサンプリングで測定した無線通信評価の結果を基準としてアンダーサンプリングで得られた無線通信評価結果を評価する。しかし、アンダーサンプリングを用いた無線通信評価はこれまでに用いられた報告されておらず、なにが評価結果に影響を及ぼすのか不明であった。そこで、 I 成分と Q 成分がアンダーサンプリングによって折り返されたことによる無線通信評価への影響、ADC の雑音がアンダーサンプリングによって折り返された影響、発振器の雑音がアンダーサンプリングによって折り返された影響の 3 点に注目してシミュレーションと実験を行った。

2 章において、アンダーサンプリングによって無線信号の I 成分と Q 成分が折り返されたことによる影響を検討するために、フリーソフトウェアの数値計算ソフトである GNU Octave を用いて数値シミュレーションを行った。ここでリアルタイムサンプリングによって得られた無線通信評価結果とアンダーサンプリングで得られた無線通信評価結果を比較したところ、EVM の差は 1dB 以内と得られた。これは QPSK 変調の最小要件と比較して非常に小さな値であるため、リアルタイムサンプリングとアンダーサンプリングによる無線通信評価結果の差は無視できるほど小さいといえる。これにより、アンダーサンプリングで I 成分と Q 成分が折り返されたとしてもリアルタイムサンプリングと同程度の精度で測定できることが示された。

3 章において、ADC の雑音がアンダーサンプリングによって折り返された影響を検討するために、2 台の FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて実験を行った。それぞれの FPGA 上に QPSK 変調器と無線通信評価システムを構成することで、被測定信号である QPSK 信号を ADC によって測定した。これにより、 I 成分と Q 成分に加えて ADC の雑音もアンダーサンプリングによって折り返される。ここで得られたリアルタイムサンプリングとアンダーサンプリングの無線通信評価結果は良好な一致を示した。この結果により、ADC の雑音もアンダーサンプリングによって折り返されたとしてもリアルタイムサンプリングと同程度の精度で測定できることが示された。

4 章において、発振器の雑音もアンダーサンプリングによって折り返された影響を検討するために、FPGA を用いた実験と同様に QPSK 変調器と無線通信評価システムを構成し、変調と復調を発振器とアナログ回路によって行った。これにより、測定される I 成分と Q 成分に発振器の雑音が含まれる。ここで得られたリアルタイムサンプリングとアンダーサンプリングの無線通信評価結果は良好な一致を示した。この結果により発振器の雑音も折り返された場合であってもアンダーサンプリングによる無線通信評価はリアルタイムサンプリングと同程度の精度で測定できることが示された。

本論文の目的は、シミュレーションと実験を通じて、本手法が従来の無線通信評価と同程度の精度で QPSK 変調波を測定できることを示すことである。この成果によって、高周波数広帯域の無線通信開発における大きな課題であった無線通信評価を実現することに加えて、これまで考えられてこなかったほど更に広帯域の周波数を用いた無線通信技術の実現を支援し、今後の無線通信の開発に大きなインパクトを与える。また、提案した手法は従来の無線通信分野に応用することで無線通信評価の低コスト化と高分解能化ができ、これまでよりも多くの研究者や技術者が無線通信分野に関わることができる。このことは低コストのネットワークの実現の一助となり、現代の社会では重要な「通信」というインフラストラクチャーの整備に貢献できるという意義を持つ。