

論文の内容の要旨

氏名：下 田 大 世

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無線通信信号品質評価システムの有効性評価と高度化に関する研究

無線通信技術の高度化により、モバイル端末で利用できるサービスは単なる通話からデータ通信へと進化し、人々の生活に広く貢献している。サービスの高度化と接続台数の増加に伴って通信トラフィックは増加し続けているため、無線通信信号の高周波化、高速化、大容量化が進められている。具体的には、キャリア周波数は 300 GHz、帯域は 25 GHz、QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 変調方式に加えてより大容量伝送が可能な QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 変調方式の使用が検討されている。次世代無線通信技術を実現するには、これらの特徴をもつ無線信号の品質を評価するための測定技術が必要である。しかし、高速に動作する測定器ほど測定精度低下と高コストであることが課題となる。特に、波形取得時に用いられる ADC (Analog to Digital Converter) はサンプリング周波数と垂直分解能がトレードオフの関係であることや高サンプリング周波数であるほど高価な傾向にあることから、高周波高速信号用測定器の開発は困難である。以上のことから、高周波高速無線通信技術開発のためには、この ADC の課題を克服した測定技術が必要である。

高周波化、高速化する無線通信信号を安価で高分解能に評価することを目的として、アンダーサンプリングを用いた無線通信信号品質評価システムが提案されている。このシステムは QPSK 変調信号を直交復調することでキャリア成分を除去し、ベースバンド信号をアンダーサンプリングで波形取得する。したがって、サンプリング周波数はキャリア周波数に依存しない。さらに、ベースバンド信号の波形取得においてもシンボルレートよりもわずかに低いサンプリング周波数を使用するため、サンプリング定理に従ったリアルタイムサンプリングと比較してサンプリング周波数を 2.5 倍以上抑えることが可能となる。したがって、ADC の課題を克服した測定技術として実現が期待されている。さらに、通信信号の測定に必要な要素技術である位相同期技術やシンボル同期技術は測定値によるデジタル信号処理で実現されており、測定系の簡素化、低コスト化を達成している。このシステムは被測定信号を QPSK 変調信号として、キャリア周波数は 1 GHz、ベースバンド信号には理想的な矩形波状の信号を用いた実験により、測定原理が成立することが明らかとなっている。しかし、このシステムが想定するシングルキャリア伝送のミリ波帯 QPSK 変調信号はベースバンド信号に帯域制限が施されるため、大きな振幅変動を伴う波形となる。そのため、帯域制限された波形に対する有効性検討が必要不可欠である。

本研究では、アンダーサンプリングを用いた無線通信信号品質評価システムの実現を目指し、上記のシステムの現状と課題に対して 2 つのテーマについて論じる。

第一のテーマは、帯域制限を施したミリ波帯 QPSK 変調信号に対する有効性評価である。帯域制限されたミリ波帯 QPSK 変調信号に対して、本システムの測定原理が成立するかを評価する。

第二のテーマは、アンダーサンプリングの測定原理を QAM 変調信号に適用することを目指し、本システムの高度化について検討する。現在のシステム構成では QAM 変調信号が測定できないことを示し、QAM 変調信号を測定可能とする新しいアンダーサンプリングを用いた無線通信信号品質評価システムを提案する。

以下、本システムにおいて、QPSK 変調信号を被測定信号とするシステムを QPSK 変調信号評価法、QAM 変調信号を被測定信号とするシステムを QAM 変調信号評価法と呼ぶ。

本論文は全 7 章から構成されており、各章の概要を以下に示す。

「第 1 章 序論」では、無線通信信号の高周波化、高速化、大容量化を目指す経緯について述べ、高周波高速無線通信技術開発のために高精度かつ高速な測定器の必要性を述べた。測定器開発に必要な高速 ADC の課題について説明し、その課題克服が期待できるアンダーサンプリングを用いた無線通信信号品質評価システムの測定原理の概要を記述した。システムの現状と課題を整理することで本研究の目的を明らかにし、本論文の構成を示した。

「第 2 章 QPSK 変調信号評価法における位相変動の補正実験」は、直交復調時に使用するローカル信号

の周波数安定度が低い条件下における測定値と位相補正部の有効性評価に関する研究である。キャリア周波数が高周波帯に移行することで局部発振器の周波数安定度が低下したことを想定して実験を行った。測定系で生じた不要な位相変動成分が位相補正部で補正可能であることを確認し、位相補正部の有効性を示した。さらに、高速フーリエ変換を使用した周波数領域による位相変動成分と残留位相変動成分の推定方法を提案、実証することで、位相補正部を実用的なものとした。したがって、局部発振器の周波数安定度が低い場合においても、ベースバンド信号から QPSK 変調信号の変調精度を測定可能であることが示唆された。

「第3章 QPSK 変調信号評価法の実証実験」は、帯域制限されたミリ波帯 QPSK 変調信号に対する本評価法の有効性評価に関する研究である。第2章の結果を踏まえてキャリア周波数を 28 GHz に高周波化し、ベースバンド信号はパルス整形フィルタを適用することで帯域を制限した。結果として、帯域制限された波形においても位相同期とシンボル同期が機能することを確認した。アンダーサンプリングによる測定精度と時間分解能が同等のリアルタイムサンプリングによる測定精度の差は、信号品質の評価結果と既存測定技術の観点から無視できるほど小さな差で一致することを確認した。以上の結果から、帯域制限されたミリ波帯 QPSK 変調信号において、本評価法の測定原理を実証した。

「第4章 アンダーサンプリングを用いた QAM 変調信号評価法の提案」は、アンダーサンプリングによる QAM 変調信号の測定を実現するためのシステム高度化に関する研究である。従来の QPSK 変調信号評価法では QAM 変調信号の位相補正が不可能であることを説明し、その課題を解決したアンダーサンプリングを用いた QAM 変調信号評価法を提案した。具体的には、アンダーサンプリングで取得した QAM の包絡線信号をシンボル同期トリガとして使用することを提案し、位相補正のためのシンボル抽出を実現することで位相補正の課題を解決した。本章では 16QAM 変調信号を被測定信号として数値計算で測定原理を確認した。提案手法によるトリガとベースバンド信号が同期することと周波数差の算出が可能であることを確認し、測定原理が成立することを示した。

「第5章 QAM 変調信号評価法の実証実験」は、第4章で提案した QAM 変調信号評価法の実証を目的とした研究である。ミリ波帯 16QAM 変調信号を用いた実験を実施し、提案手法による位相同期が機能することを確認した。アンダーサンプリングによる測定はリアルタイムサンプリングによる測定と同程度の精度であることを示した。以上の結果から、本評価法の測定原理を実証し、アンダーサンプリングを用いて QAM 変調信号の変調精度の測定が可能であることを明らかとした。

「第6章 QAM 変調信号評価法における多値 QAM 変調信号の測定」は、第4章と第5章で提案、実証した QAM 変調信号評価法による多値 QAM 変調信号の測定に関する研究である。64QAM 変調信号を被測定信号とした場合を想定して、本評価法の高度化と有効性について検討した。多値化されることで周波数差推定部が機能しなくなる可能性を説明し、シンボル使用率を上げる手法を適用することでその影響を軽減可能であることを示唆した。さらに、アンダーサンプリングの測定はリアルタイムサンプリングによる測定と同程度の精度であることを示した。以上の結果から、多値 QAM 変調信号測定時における周波数差算出部の高度化とアンダーサンプリングによる測定の有効性を示し、多値 QAM 変調信号の測定が可能であることを実証した。

「第7章 結論」では、各章における研究結果とその成果を整理することで本研究を総括した。

以上の成果により、アンダーサンプリングを用いた無線通信信号品質評価システムが理想的な波形の QPSK 変調信号だけでなく、ミリ波帯シングルキャリア伝送で用いられる実用的な QPSK 変調信号の波形評価が可能であることを示し、システムの高度化によって QAM 変調信号の測定も可能となった。さらに、これらのアンダーサンプリングによる評価法は、時間分解能が同等な条件下においても、リアルタイムサンプリングと同程度の精度で信号を評価できることを明らかにした。したがって、本システムが高周波帯シングルキャリア伝送の無線通信信号を低コストで高分解能に測定できることを実証した。高周波高速無線通信システムの普及とさらなる高周波化、高速化、大容量化を目指す次世代無線通信システムの研究開発を促進し、限りある電波資源の活用と通信インフラの整備に貢献する意義をもつ。