

## 論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 大 谷 昭 仁

（副査） 教授 三 枝 健 二

准教授 布 施 匡 章

近年の著しく増加するモバイルデータトラフィックへの対応と、モバイル通信システムのさらなる高速大容量化・低遅延化・同時多元接続化を実現するために、第5世代通信システム（5G）が、オリンピックイヤーである2020年から本格導入となった。5Gは、現在、Sub6（サブシックス）という周波数帯が用いられている。Sub6とは、6GHz以下の周波数帯という意味で3.7GHz帯や4.5GHz帯の電波のことを言い、モバイル通信事業者には100MHzの帯域が各々1つあるいは2つ割り当てられている現状となっている。しかしながら、今後はより多くの情報を高速に伝送するために、5G規格で規定されている更に高い周波数である28GHz帯のキャリア信号導入が検討されている。また、第6世代通信システムとして、120GHz、300GHzを用いるミリ波帯通信システムの研究開発も進みつつあり、通信の高速化に伴うキャリア信号の高周波化、加えて帯域の拡大化は留まることを知らない状況となってきている。このような背景のもと、総務省は、「電波資源拡大のための研究開発」の中で、140GHzから300GHzのQPSK（Quadrature Phase Shift Keying）変調信号の品質を、解析帯域幅15GHz以上で評価する計測システムの早期開発を要求してきている。さらに、最近の動向としては、周波数利用効率の側面から多値化による無線通信信号の高度化の研究が進み、16, 64, 256QAM（Quadrature Amplitude Modulation）等の伝送方式の導入検討も進みつつあり、高度に多値化した無線通信信号品質評価も重要となりつつある。

一般的に、信号品質評価においては、被測定信号を直接、キャリア周波数の2倍を超えるサンプリングレートをもつADC（Analog to Digital Converter）を用いてリアルタイムに波形観測を行い、その波形からEVM（Error Vector Magnitude）を算出し、算出された値から信号品質を評価する方法がとられている。しかしながら、現状の技術では、①このような高周波信号の2倍を超えるサンプリングレートに対応できるADCの実現は困難である。また、②ADCは高周波化されるにつれ、分解能が低くなることから、算出されたEVMの値が低くなったとき、それが被測定信号そのものの劣化なのか、測定技術による劣化なのかの判断がつかなくなり、実質的に測定の限界が生じる。そのうえ、③仮に高周波数に対応したADCが開発されたとしても、評価すべき帯域が広帯域となるほどADCそのものの価格が高くなり、測定コストアップにつながることから、現実的な測定手段として使えないという課題があった。

これらの課題を解決するために、「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」が実施され、無線通信信号品質評価の波形測定手法に新しくアンダーサンプリングという手法を導入することにより、これらの課題が解決されることが示された。この研究成果は、次世代無線通信システムの開発の促進に大きく貢献されるものと評価され、既に特許権利化がなされている。しかしながら、この研究成果においても、①QPSK変調信号を直交復調する際に問題となる局部発振器の安定度（周波数変動）による測定値への影響が未検討であること、②実証実験で使われた無線信号の周波数帯がミリ波帯でないこと、加えて実用面ではチャンネル間干渉を避けるために変調信号に帯域制限が加わるのに対して、実験では理想的な矩形波変調波が用いられており、実用化という面で帯域制限された無線信号に対しての確認が実施されていないこと、③提案されている測定システム構成がQPSK変調信号にのみしか対応できておらず、16, 64, 256QAM等の高度に多値化した高周波無線通信信号の品質評価ができない等の未検討事項と課題が残されていた。

そこで、申請者は、上述の①から③の未検討事項と課題を解決するために、キャリア周波数28GHzのQPSK無線信号を発生する系を実際に構築するとともに、キャリア周波数とローカル周波数の差が変動した場合の実験を実施し、既に提案されている「アンダーサンプリングを用いたQPSK変調信号評価システム」のトリガ信号生成技術が十分な精度を持ってQPSK無線通信信号を評価できることをシミュレーショ

ンと実験結果から示すとともに、帯域制限した変調信号に対しても十分な動作が可能であり、実用的な測定が可能であることを実証した。加えて、高度に多値化した高周波無線通信信号の品質評価を行うために、無線通信信号伝送波形のポーレートが一定であることに注目し、これまでに提案されている測定システムに、新たに包絡線検波部と信号処理部を付加する手法を考案し、その原理を示すとともに実用化面での実証実験結果も同時に示すという成果を残し、特許出願も実施している。特に、今回新たに提案された「QAM 変調信号の信号品質評価手法」については、QAM 変調信号では I-Q 信号が位相変動に加えて振幅変動が伴うため、従来手法のみでは位相補正や局部発振補正ができないという課題に挑戦し、包絡線検波の結果を用いることで解決している点に大きな新規性があり、高い評価ができる。アンダーサンプリングを用いて高度な多値変調無線信号の信号品質評価を可能とした技術としては、世界初であり高周波無線通信信号の評価技術に対してブレイクスルーをもたらすことは必須であり、大きな注目に値するものである。

本論文は、その研究成果を纏めたものであり、序論から結論までの7章からなる。以下、論文の章立てに沿って、研究の意義や審査判断の内容を報告し、論文審査の結果の要旨とする。

第1章は、全世界のモバイル通信トラフィック量の増大傾向について述べるとともに、今後のモバイル通信システムのさらなる高速化・大容量化を実現するためにキャリア周波数が高まる傾向にあること、現状の測定技術における未検討事項および課題を述べ、本研究の背景、目的、波及効果を示している。次に、「アンダーサンプリングを用いた QPSK 変調信号評価システム」の基本原理や構成を説明し、最後に、本論文の構成について示している。

第2章では、アンダーサンプリングを用いた QPSK 変調信号評価法におけるキャリア周波数とローカル信号の周波数差揺らぎの測定結果に与える影響に関して、シミュレーションおよび実験を行った結果が示されており、残留位相雑音が補正されており測定系で生じる位相変動に影響されないことが示されている。本手法の有効性が的確に示されている。

第3章では、チャンネル間干渉を避けるために実際の無線信号に利用される帯域制限された 28 GHz 帯の QPSK 変調信号を実際に用いて実証実験を行うとともに、リアルタイムサンプリングとの EVM 評価結果の比較検討を行い、EVM が 1 dB 以内で一致していることからミリ波帯においてもアンダーサンプリングを用いた QPSK 変調信号評価法の実用性が高いことが示された。

第4章では、アンダーサンプリングを用いて QAM 変調信号の評価法の提案が行われており、原理、システム構成と、シミュレーションによる原理確認としてトリガ信号の抽出方法、キャリア周波数とローカル周波数差の算出方法に関する検討結果が示された。非常に独創性が高く、有用性が高い提案となっている。

第5章、第6章では、アンダーサンプリングを用いて 28 GHz 帯の 16QAM 変調信号の評価を、構築したシステムを用いて実証した結果が示されている。4章で示した提案システムが数値シミュレーションと同様に動作することが確認され、提案手法がリアルタイムサンプリングと同程度の測定精度であることが示された。加えて、64QAM 変調信号のように高度に多値化した 28 GHz 帯無線通信信号の評価に関しての検討結果も述べられた。新しいキャリア周波数とローカル周波数差の算出方法も提案され、64QAM 無線通信信号等の非常に高度化された多重化信号にも本測定技術が対応可能であることが示された。

第7章では、上記内容を纏めるとともに、本論文の意義が述べられた。

以上、申請者は、キャリア周波数とローカル周波数の差が変動した場合の実験を実施し、既に提案されている「アンダーサンプリングを用いた QPSK 変調信号評価システム」のトリガ信号生成技術が十分な精度を持って QPSK 無線通信信号を評価できること示すとともに、帯域制限した変調信号に対しても十分な動作が可能であり、実用的な測定が可能であることを実証した。加えて、高度な多値化高周波無線通信信号の品質評価のために、新たに包絡線検波部と信号処理部を付加する手法を考案し、その詳細な原理を示すとともに実用化面での実証実験結果も同時に示すという大きな成果を残した。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以上