

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 大谷 昭 仁

（副査） 教授 三枝 健 二 准教授 今池 健

特任教授 作田 幸 憲

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る。5Gは、映画1本を数秒でダウンロードする能力を持つが、その高速性を実現するために、従来用いられてこなかった非常に高い周波数のキャリア信号が用いられる。今回、日本で導入される5Gでは、28GHz帯のキャリア信号が用いられることが知られている。しかし、今後はより多くの情報を高速に伝送するために、もっと高い周波数である80GHz帯、120GHz帯のキャリア信号導入が検討され始めている。また、第6世代通信システムとして、300GHzを用いるミリ波帯通信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いる。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の実現は不可能である。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、高周波になるほど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。

そこで、申請者は上述の①から③の課題を解決するために、QPSK変調信号の信号評価に、アンダーサンプリング技術の概念を世界で初めて導入した「アンダーサンプリング技術を用いたQPSK変調信号評価法に関する研究」を実施し、その評価法の実現性に関してシミュレーションおよび実験を通して検証し、提案手法が従来の課題を解決するのに非常に有用であることを示すという大きな成果を残した。特に、QPSK変調信号の特徴に着目して、 I 成分と Q 成分の位相から4倍角を算出することによりキャリア信号と局部発振器間の周波数偏差を正確に求め、補正する方法を考案するとともに、位相変調信号のポーレートが一定であることに注目し、この信号からトリガ信号を生成しつつ、アイダイアグラムを生成するという新しい手法も同時に考案している。本測定法で考案された手法は、本測定法の測定精度の信頼性を担保するものとなっており、非常に大きな成果であると言える。また、今回申請者の考案した手法は、基本的にソフトウェア処理をベースとしていることから、一般的に市場にでている低周波信号を観測する分解能の高い低速なADCと本手法を組み合わせるだけで、高周波数に対応した信号品質評価装置が実現できる。このため、測定対象とするキャリア信号の周波数によらず、測定コストを大きくダウンさせつつ信号品質評価可能という従来の測定手法による測定限界周波数をブレイクスルーするという点でも、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5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章では、最初に、2016年から2021年にかけての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、今後、その通信システムを支えるために、高周波帯のQPSK

変調通信信号品質評価法が必要となることを示している。さらに、QPSK 変調通信信号評価法として、BER(Bit Error Rate)とEVMを比較し、EVM評価が無線通信分野では重要な指標となることを示すとともに、現状の測定技術における課題を述べ、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提案を行うとともにその原理や構成を説明し、コスト法を基本としたアンダーサンプリングを用いた無線信号評価法に適したキャリア信号と局部発振器の周波数補正法の原理について述べ、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変調信号評価法の評価を検討するにあたり、理想的な条件での計算機シミュレーションを行うことで、本手法で最も懸念事項であるI成分とQ成分の折り返し成分が、測定値にほとんど影響がないことを示している。具体的には、第1章で提案したキャリア信号と局部発振器を同期させる補正法を、実際にシミュレーション上で動作させて得られた本手法によるEVMと、リアルタイムな波形測定から得られたEVMを比較し、その値が、それぞれ、-32.9dB、-33.4dB、であり、その差が0.5dBであることを示している。また、それぞれのEVMは2.14%と2.26%と表すこともできる。3GPPで規定されているLTE(Long Term Evolution)の最小要件であるEVMが17.5%であることを考慮するとリアルタイムな波形観測と本手法による差は0.12%と無視できるほど小さいことを示している。

第3章では、実際に本手法を用いた評価システムを構築した際に現れるADCの雑音の折り返しが、どの程度、本測定手法に影響を与えるかについて、実験器を用いて検証した結果が報告されている。具体的には、2台のFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて、QPSK変調信号発生器とアンダーサンプリングを用いたQPSK変調信号評価装置を構築し、本手法で得られたEVMと、リアルタイムな波形測定から得られたEVMを比較している。構築したQPSK変調信号発生器からの出力信号の長時間EVM評価において、アンダーサンプリングを用いたQPSK変調信号評価装置でのEVMが-29.7dBであり、リアルタイムな波形測定から得られたEVMが-30.7dBであったことから、その値はほぼ一致することが示されており、ADCの雑音が折り返されたとしても本測定法で十分な評価精度を得られることを示している。

第4章では、完全に独立した送信系と受信系を構築するために、独立な2台の発振器を用いたQPSK変調信号発生器とアンダーサンプリングを用いたQPSK変調信号評価装置を構築し、基準発振器の雑音の折り返しが、どの程度本測定手法に影響を与えるかについて検討がされている。さらに、評価対象となる無線信号がバースト的であった場合の影響についても評価が行われた。評価の結果、本手法を用いた場合、基準信号発生器の2台が完全に独立な場合であっても、その雑音の折り返しの影響はほとんど見られないこととバースト信号を測定した場合であっても、本測定法で十分な評価精度を得られることが示され、本手法の無線通信評価に対しての有効性が示された。

第5章では、上記内容を纏めるとともに、提案した「アンダーサンプリングを用いたQPSK変調信号評価法」の将来展望について述べている。

以上、申請者は、従来技術では成しえなかった高いキャリア周波数をもつQPSK変調信号の信号品質の評価において、アンダーサンプリング技術を世界で初めてこの評価に導入し、高分解能、高性能化を促すことに成功するという成果を残した。今後爆発的に増大するモバイルデータトラフィックを支える新たな無線通信システムに研究開発に貢献するとともに、従来実用化が困難であった300GHz帯QPSK変調信号の信号品質評価装置実現に大きなブレークスルーを世界的に与えるという成果も残している。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

令和2年2月20日