

学 位 論 文 題 名

移動通信用超伝導無線技術に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、移動通信システムではネットワークの高速性を活かした通信サービスのマルチメディア化、コンテンツの大容量化と高品質化が進められ、通話はもとより電子メール、テレビ電話、音楽/映像配信などのモバイルマルチメディアサービスが積極的に展開されている。電波を用いて通信を行う移動通信システムでは、限りある周波数資源を有効に利用することをまず基本条件として考慮する必要がある。このために、第一の重要技術課題として無線装置における他方式もしくは自方式が用いる隣接帯域との干渉影響の回避がある。

また、割り当てられた周波数帯において高速・大容量のデジタルデータを伝送する際に所望の通信品質を確保しなければならないが、基地局設備設置コストおよび移動端末の消費電力ならびに電磁環境両立性を考慮すると、基地局数の増加や移動端末の送信電力増大ではなく、基地局受信フロントエンドの受信感度を改善することが最も有効である。よって、第二の重要技術課題として基地局受信フロントエンドの高感度化の達成がある。

第一の課題を克服するために、基地局受信フロントエンドにおける高選択性の確保が必須となる。高選択性の達成には受信フィルタの減衰特性の極限的急峻化が不可欠である。従来技術を用いてフィルタを構成する場合、共振器の段数を重ねてフィルタを構成すれば急峻な減衰特性の実現は不可能ではない。ところが、これらのフィルタで高 Q を達成するには常温での導体損や誘電損の影響を低減するために、体積の大きい、高蓄積電力のフィルタ素子の適用が必須であり、しかも共振器の段数が増えるにつれて挿入損失も増大する欠点がある。この結果、受信機雑音(受信機内部で発生する雑音)も増大することから受信フロントエンドの高感度化は困難となる。すなわち、従来技術では受信フロントエンドの高選択性は確保できても高感度化は達成困難であるという問題が生ずる。

第二の課題を解決するためには、受信フロントエンドの低雑音化が効果的である。受信フロントエンドの雑音電力にはアンテナ雑音(アンテナにより受信される地表放射雑音、人工雑音等の外来雑音およびアンテナ自身の損失に起因する内部雑音)と受信機雑音の両方が含まれることから、それらの影響を定量的に評価するとともに移動通信基地局に適した低雑音受信フロントエンドの構成法を確立することが必要である。

ここに、従来技術では実現困難な、第一および第二の重要技術課題を同時に解決する新しい技術の確立、換言すれば、極めて低損失かつ急峻な選択特性を有する移動通信基地局用高性能受信フロントエンドの開発の必要性が生ずる。

本論文は、移動通信における周波数利用効率のさらなる向上を目的として超伝導技術の移動通信への応用という観点から移動通信用基地局受信フロントエンドの高感度化・高選択度化を狙う極低温受信フロントエンドの開発に必要な基本技術ならびに実環境に対応した設計技術の研究成果をまとめたものである。本研究は、特に超伝導フィルタの導入に伴う極低温低雑音増幅器の開発、基地局高感度化に必須の熱雑音および人工雑音を含むアンテナ雑音の実環境における測定・観測評価ならびに極低温受信フロントエンドで発生する非線形ひずみを低減するための入力信号ピーク対平均電力比の低減手法を対象とするものである。

第1章では、まず移動通信システムの発展経緯を概説した。また、将来の移動通信システムに向け

たさらなる周波数の有効利用の観点から高性能受信フロントエンド開発の必要性を述べた。第2章以降の構成と得られた成果の概要を以下に示す。

第2章では、移動通信基地局装置の基本構成について述べるとともに、送信共通増幅器および屋外受信増幅器について、これまでの開発成果を含めて概説した。また、受信系の高感度化を検討するうえで必要となる等価雑音温度を導入した。

第3章では、70K以下の極低温下でも低雑音増幅器として機能する極低温低雑音増幅器について、GaAs-HEMTおよびGaAs-FETで構成される3段増幅器の構成を述べるとともに冷却負荷軽減の観点から極低温低雑音増幅器の冷却と雑音指数改善効果について考察した。また近年、高出力・高線形増幅器として着目されているGaN-HEMTについて、極低温下における基本特性を実験評価することにより極低温低雑音増幅器として適用可能であることを示した。

第4章では、極低温受信フロントエンドで発生する非線形ひずみの低減に向けた検討として、等振幅・等周波数間隔のマルチトーン信号を用いたPAPRの低減化手法を述べた。具体的には、マルチトーン信号のPAPRを低減する初期位相設定法を導出するとともに、PAPRの低減効果を明らかにした。また、本手法は初期位相関係が保存される両側波帯振幅変調信号においても有効であることを示し、実験によりPAPRの低減効果を検証した。さらに、最急降下法を適用することによりマルチトーン信号のPAPRのさらなる低減化に取り組み、具体的な低減効果を数値計算により明らかにした。

第5章では、アンテナ雑音を評価した。まず、基地局受信系におけるランダム雑音を計算推定した。また、実環境におけるアンテナ雑音の平均電力を測定した。つぎに、人工雑音（インパルス性の雑音や雷サージなど）の瞬時値評価法として振幅確率分布を採用するとともに実環境において人工雑音を観測し、極低温受信フロントエンドの高感度化に与える影響を考察した。その結果、2GHz帯のW-CDMA信号を用いる第3世代方式では人工雑音の影響は無視できること、260MHz帯では人工雑音の影響が大きいことを明らかにした。

第6章では、試作した基地局用極低温受信フロントエンドについて述べた。具体的には、高温超伝導フィルタと第3章で製作した極低温低雑音増幅器を、冷凍機により70Kまで冷却する極低温受信フロントエンドを試作して、その基本特性を明らかにした。また、冷凍機の信頼性を実験評価するとともに、極低温受信フロントエンドを移動通信基地局受信系に適用することにより受信感度改善効果、高選択性の効果および基地局当たりのサービスエリア（無線ゾーン半径）拡大効果がそれぞれ得られることを示した。さらに、冷凍機の故障に対する極低温受信フロントエンドのフェイルセーフ化を示した。

以上述べたように、基地局用極低温受信フロントエンドは移動通信システムの高感度化・高選択度化に貢献するとともに周波数のさらなる有効利用に寄与する基盤技術の一つとなり得る。実際、米国では移動通信用に極低温受信フロントエンドは実用化されており、また近年、中国においても大学を中心に移動通信用高温超伝導フィルタの実用化研究が盛んに行われるようになっている。今後、冷凍機の低コスト化の課題が克服され、わが国のみならず全世界において、極低温受信フロントエンドのビジネス化の進展と、移動通信システム、無線中継システム、放送などへの高温超伝導技術適用が一挙に開始されることが期待される。

学位論文審査の要旨

主査	教授	野島俊雄
副査	教授	宮永喜一
副査	教授	小柴正則
副査	教授	小川恭孝
副査	准教授	山本学

学位論文題名

移動通信用超伝導無線技術に関する研究

本論文は、移動通信における周波数利用効率のさらなる向上を目的として超伝導技術の移動通信への応用という観点から移動通信用基地局受信フロントエンドの高感度化・高選択度化を狙う極低温受信フロントエンドの開発に必要な研究成果をまとめたものである。特に超伝導フィルタの導入に伴う極低温低雑音増幅器の開発、基地局高感度化に必須の熱雑音および人工雑音を含むアンテナ雑音の実環境における測定・観測評価ならびに極低温受信フロントエンドで発生する非線形ひずみを低減するための入力信号ピーク対平均電力比の低減手法を対象とするものである。

第1章では、移動通信システムの発展経緯を概説している。また、将来の移動通信システムに向けたさらなる周波数の有効利用の観点から高性能受信フロントエンド開発の必要性を述べている。

第2章では、移動通信基地局装置の基本構成について述べるとともに、送信共通増幅器および屋外受信増幅器について、これまでの開発成果を含め概説している。また、受信系の高感度化を検討するうえで必要となる等価雑音温度を導入している。

第3章では、70K以下の極低温下でも低雑音増幅器として機能する極低温低雑音増幅器について、GaAs-HEMTおよびGaAs-FETで構成される3段増幅器の構成を述べるとともに冷却負荷軽減の観点から極低温低雑音増幅器の冷却と雑音指数改善効果について考察している。また近年、高出力・高線形増幅器として着目されているGaN-HEMTについて、極低温下における基本特性を実験評価することにより極低温低雑音増幅器として適用可能であることを示している。

第4章では、極低温受信フロントエンドで発生する非線形ひずみの低減に向けた検討として、等振幅・等周波数間隔のマルチトーン信号を用いたPAPRの低減化手法を述べている。具体的には、マルチトーン信号のPAPRを低減する初期位相設定法を導出するとともに、PAPRの低減効果を明らかにしている。また、本手法は初期位相関係が保存される両側波帯振幅変調信号においても有効であることを示し、実験によりPAPRの低減効果を検証している。さらに、最急降下法を適用することによりマルチトーン信号のPAPRのさらなる低減化に取り組み、具体的な低減効果を数値計算により明らかにしている。

第5章では、アンテナ雑音を評価している。はじめに、基地局受信系におけるランダム雑音を計算推定している。また、実環境におけるアンテナ雑音の平均電力を測定している。つぎに、人工雑

音 (インパルス性の雑音や雷サージなど) の瞬時値評価法として振幅確率分布を採用するとともに実環境において人工雑音を観測し、極低温受信フロントエンドの高感度化に与える影響を考察している。その結果、2GHz 帯の W-CDMA 信号を用いる第 3 世代方式では人工雑音の影響はないこと、260MHz 帯では人工雑音の影響が大きいことを明らかにしている。

第 6 章では、試作した基地局用極低温受信フロントエンドについて述べている。具体的には、高温超伝導フィルタと第 3 章で製作した極低温低雑音増幅器を、冷凍機により 70 K まで冷却する極低温受信フロントエンドを試作するとともに、この受信フロントエンドの基本特性を明らかにしている。また、移動通信基地局受信系に適用することにより受信感度改善効果、高選択性の効果および一基地局当たりのサービスエリア (無線ゾーン半径) 拡大効果がそれぞれ得られることを示している。さらに、冷凍機の故障に対する極低温受信フロントエンドのフェイルセーフ化を示している。

これを要するに、著者は、移動通信用無線装置の高感度化・高選択度化に貢献するとともに周波数のさらなる有効利用に寄与する基盤技術に関する有益な新知見を得たものであり、情報通信技術の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。