

氏名	みやけ ゆうじ
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成 27 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，先行の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）通信工学専攻
論文題目	準天頂衛星システム用ショートメッセージ通信における 同期式 SS-CDMA 方式の研究
指導教員	東北大学教授 末松 憲治
論文審査委員 主査	東北大学教授 末松 憲治，東北大学教授 安達 文幸 東北大学教授 陳 強，東北大学准教授 亀田 卓 准教授 平 明德（東北大学電気通信研究所）

## 論文内容要旨

2011 年 3 月に起きた東日本大震災の際に固定電話や携帯電話等の地上系通信インフラ網は津波で喪失してしまい，津波の被害に合わなかった携帯電話基地局も多数の通信要求があったため輻輳を起こしたり，電力供給が困難であったため数日で使用不可能となってしまった．そこで，災害時に日本独自の準天頂衛星システム(QZSS)を用いロケーションとショートメッセージを送る安否確認システムが内閣府より示されている．本論文は QZSS 用安否確認ショートメッセージ通信システムの実現に対して，多数のユーザ収容を実現するために衛星測位信号を用いて送信時に時間・周波数制御を行い，ユーザ間の符号直交性を実現する上りリンク同期式スペクトラム拡散・符号分割多元接続(SS-CDMA)方式の実現性について設計評価および実験的検証に関する研究をまとめたものであり，全編 5 章からなる．

第 1 章では，QZSS 用ショートメッセージ通信システム実現のための要求項の整理とそれを実現するための上りリンク同期式 SS-CDMA 方式の提案を行っている．QZSS 用ショートメッセージ通信システムは各個人が所有する携帯端末から通信対象の衛星まで直接通信を行うことと災害時に対応出来るような高密度なユーザ多元接続が必要となる．そこで，我々は長拡散符号を用いたスペクトラム拡散を用いることで低送信電力のユーザ端末でも衛星と直接通信を実現し，さらにその長拡散符号をユーザ多元接続に用いることで多数のユーザ収容の実現する SS-CDMA 方式が提案している．ここで，CDMA によるユーザ多元接続に着目すると，拡散符号長に対して 100 %に近いユーザ収容を実現するためにはユーザ間で用いる拡散符号の符号直交が重要となる．符号直交が崩れる要因としてはユーザ間の時間・周波数偏差である．QZSS 用ショートメッセージ通信システムは災害時の運用を想定しているため，災害範囲が非常に広域の場合，その広域に散らばった端末間の時間・周波数同期をとる必要がある．CDMA を用いる第三代啓他電話のような従来システムでは，基地局からのフィードバック情報を用いて同期が行われているが，QZSS 用ショートメッセージ通信システムは衛星通信を前提としているため，フィードバック構成をとるのは困難である．そこで，本論文では衛星測位信号を用いた送信タイミング・周波数制御による上りリンク同期式 SS-CDMA 方式の提案を行う．

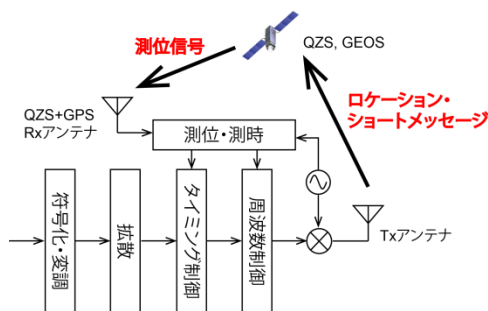


図 1: 上りリンク同期式 SS-CDMA 方式の端末機能

QZSS のような高精度測位システムの衛星測位信号は正確な自身の位置情報・時刻情報・周波数情報を配信している．それらを用いて衛星到達時点で全ての上りリンク信号を同期し，ユーザ間の符号直交性を実現する．図 1 に上りリンク同期式 SS-CDMA 方式の端末機能ブロックを示す．符号化・変調したデータを長拡散符号で拡散した信号に対して衛星測位信号から測位・測時した情報を用いて送信タイミングと送信周波数を制御しロケーション・ショートメッセージを送信する．

また，ユーザ端末から 39,000 km 離れた通信対象の衛星に直接通信を実現するための回線設計を行い，符号長 10000 以上の拡散符号を用いることで端末-衛星間の直接リンクを実現出来ることを示した．

第 2 章は長拡散符号を用いた SS-CDMA 通信において拡散符号長に対して高密度なユーザ多重を実現するために必要な同期式 SS-CDMA 方式における所要時間・周波数同期精度の検討を行っている．ユーザ間の時間偏差・周波数偏差による直交崩れが SS-CDMA 通信の伝送特性に及ぼす影響を評価している．時間偏差・周波数偏差による劣化許容量を回線設計値と所要 SNR の観点からそれぞれ 1 dB 以下と設定し評価した．拡散符号長 1024 に対してほぼ 100 % となる 1000 ユーザを多重した場合と，ほぼ 50 % となる 500 ユーザを多重した場合で評価を行った．

まず，時間同期精度について同時多重する各ユーザに設定した最大タイミング偏差量以下のタイミング偏差をそれぞれに与え評価し，時間同期誤差による伝送特性の劣化を計算機シミュレーションによって算出した．図 2 はタイミング偏差の影響を考慮した SS-CDMA 通信の BER 特性を示す．BER  $10^{-4}$  (システムとして PER 1 % を目標とし，パケット構成が 300 bit/packet であるため)での劣化量を見ると，劣化を 1 dB 以下に抑えることが出来るのは最大タイミング偏差量が 1/8 チップのときであることがわかった．これは回線設計諸元値から換算すると 56 ns である．

次に周波数同期精度について同時多重する各ユーザに設定した最大周波数偏差量以下の周波数偏差をそれぞれに与え評価し，周波数同期誤差による伝送特性の劣化を計算機シミュレーションによって算出した．図 3 は周波数偏差の影響を考慮した SS-CDMA 通信の BER 特性を示す．BER  $10^{-4}$  での劣化量を見ると，劣化を 1 dB 以下に抑えることが出来るのはシンボルレート正規化最大周波数偏差量が 1/4 のときであることがわかった．これは回線設計諸元値から換算すると 0.02 ppm である．このように拡散符号長に対してほぼ 100 % のユーザ多重を実現するために必要な時間・周波数同期精度を算出した．

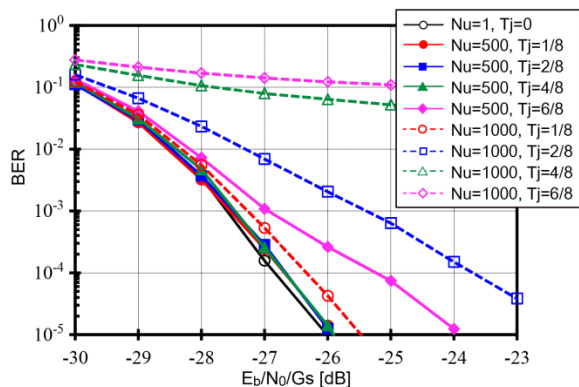


図 2: タイミング偏差の影響を考慮した SS-CDMA 通信の BER 特性

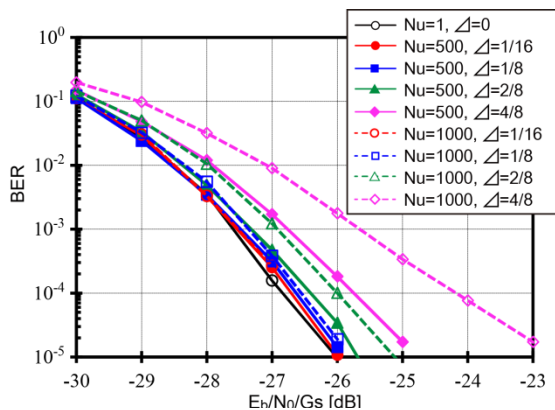


図 3: 周波数偏差の影響を考慮した SS-CDMA 通信の BER 特性

第3章では、衛星測位信号を用いた端末におけるクロック精度の実験的評価を行っている。第2章で評価した時間・周波数同期精度について、実機を用い端末において実現出来る時間・周波数同期精度を実験的に検証する必要がある。そこで、本章では市販されている GPS オシレータを用いてユーザ間で実現可能な時刻・周波数同期精度について測定・評価を行っている。

まず、時刻同期精度の評価として2つの GPS オシレータから GPS の時刻情報に同期し出力されるタイミングパルスの相対誤差を測定し、ユーザ間で実現出来る絶対時刻の同期精度を評価した。端末間に生じる絶対時刻誤差の許容量を 20 ns と設定した。これは次章にて評価を行う位置精度による送信タイミング制御誤差を考慮し、第2章で求めた所要時間同期精度 56 ns の半分以下としたからである。測定では、図4のように一方の GPS オシレータに接続する GPS アンテナはオープンスカイを確保し、もう一方の GPS オシレータに接続する GPS アンテナは電波吸収体を用いて一方角を遮蔽し、意図的に可視衛星数を減少させ測定を行った。これは都市部においてビル等の遮蔽を受けている環境を模擬したものである。図5はタイミングパルスの相対誤差を累積確率密度関数(CDF)として評価した結果である。時刻同期誤差の最大値は 38 ns であった。しかし、そのような大きな相対誤差の発生頻度は非常に小さく、端末において実現出来る絶対時刻誤差の目標値と設定して設定した、20 ns において CDF=99 [%]以上を達成すること出来ており、同期式 CDMA 方式を用いて収容率をほぼ 100 %とするために十分な時刻同期精度が端末において実現可能であることを示した。

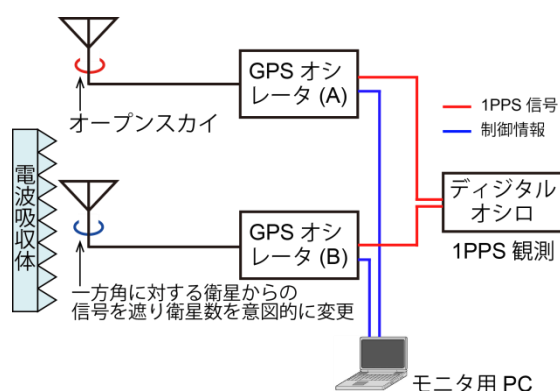


図4: 時刻同期精度評価のための測定系

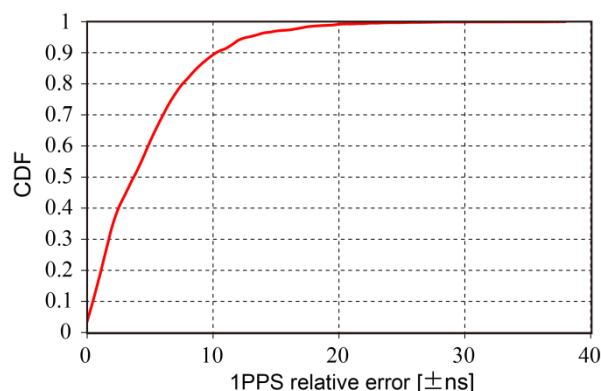


図5: 時刻パルスの相対誤差の累積確率密度

次に周波数同期精度の評価として位相雑音の評価を行った。これは、SS-CDMA 通信システムでは、回線設計の都合上、シンボルレートが 220 symbol/s と非常に低速であり、シンボルレート付近の 10~1000 Hz 程度の周波数変動である位相雑音が伝送特性に大きな影響を与えると考えたからである。図6にGPS同期型 TCXO の位相雑音測定結果を示す。この測定結果を基に位相雑音モデルを生成し、計算機シミュレーションにて生成した位相雑音モデルの時間波形を注入し、位相雑音によって SS-CDMA 通信の伝送特性に与える影響を評価した。図7に位相雑音を考慮した SS-CDMA 通信の BER 特性を示す。図中の+20 dB, +40 dB は携帯端末搭載のために小型・低コスト化を考慮して測定した位相雑音を基準にし、20~40 dB 特性劣化させた条件で評価を行ったものである。位相雑音による特性劣化は非常に小さいことがわかる。これは長周期の位相変動が起きておらず、さらに短周期の大きな位相変動は長拡散符号を用いた逆拡散によって抑圧が可能であり、大きな BER 特性劣化が起きていないと考えられる。

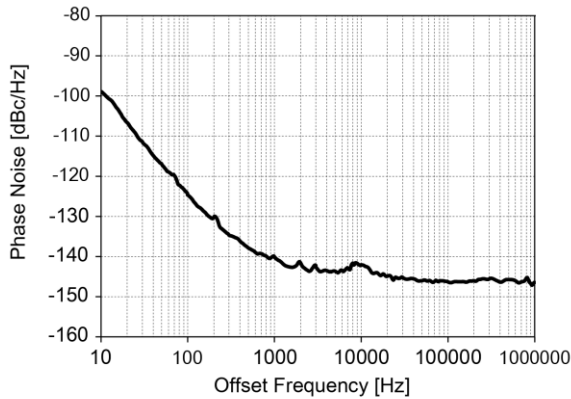


図 6: GPS 同期型 TCXO の位相雑音特性

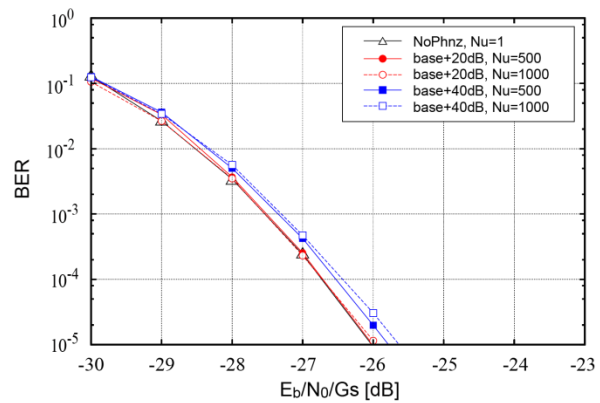


図 7: 位相雑音の影響を考慮した SS-CDMA 通信の BER 特性

第 4 章では、第 3 章で評価した時刻同期精度に加え、位置情報を考慮した送信タイミング制御の実現性について述べている。提案する上りリンク同期式 SS-CDMA 方式は広域に散らばるユーザ間の位置による衛星までの距離差をキャンセルするために、自身の位置を用いて通信対象の衛星まで距離を算出し、送信タイミング制御を行う。そこで、第 3 章で用いた市販の GPS オシレータを用い、現状の GPS 受信機の測位精度を用いて衛星到達時点での送信タイミング制御誤差の評価を行った。この位置誤差による送信タイミング制御誤差の許容量も第 2 章で求めた時間同期精度 56 ns の半分以下とし、20 ns と設定した。図 8 は位置精度測定結果から位置誤差による送信タイミング制御誤差を算出し、CDF にしてプロットしたものである。図中の平均化というものは準静止状態を仮定し、端末が動かないものとして位置精度を平均化処理したものである。平均化処理を行うことで現状の GPS 受信機の測位精度を用いても衛星到達時点で 20 ns を超えるタイミング誤差が発生しないことがわかる。第 3 章で評価した絶対時刻と合わせても衛星到達時点でユーザ間の時間同期精度は第 2 章で求めた許容タイミング偏差量である 56 ns 以下となることを示し、衛星測位信号を用いた上りリンク同期式 SS-CDMA 方式の実現可能性を示した。

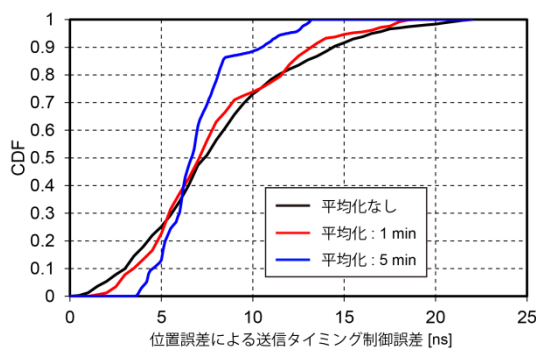


図 7: 位置誤差による送信タイミング制御誤差の累積確率密度関数

以上のように、本論文では衛星測位信号を用いた上りリンク同期式 SS-CDMA 方式を提案し、計算機シミュレーション及び実験的検討を行うことにより、その実現性可能性を示した。

# 論文審査結果の要旨

東日本大震災以降、日本独自の準天頂衛星システム（QZSS）を用いた安否確認用ショートメッセージ通信システムの実現が求められている。本論文は、QZSS ショートメッセージ通信システムの実現に向けて、多数のユーザ収容を実現するために、送信時に衛星測位信号を用いた時間・周波数制御を行ってユーザ間の符号直交性を保つ上りリンク同期式スペクトラム拡散・符号分割多元接続（SS-CDMA）方式の提案と、その設計評価および実験的検証に関する研究をまとめたものであり、全編 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、長拡散符号を用いた SS-CDMA 通信において拡散符号数に対して 95%以上のユーザ収容の実現を目標とする同期式 SS-CDMA 方式の所要同期精度の検討を行っている。多数の端末を収容する CDMA 通信におけるユーザ間の直交性劣化が伝送特性に及ぼす影響を評価し、本論文で提案する回線設計諸元で換算すると時間同期精度は $\pm 56$  ns、周波数同期精度は 0.02 ppmであることを明らかにしている。本成果は、多数ユーザの収容を実現するために必要な時間・周波数同期精度を示しており、極めて重要な知見である。

第 3 章では、衛星測位信号を用いた端末におけるクロック精度の実験的評価について述べている。GPS 同期型発振回路を用い、ユーザ間で実現可能な時刻・周波数同期精度について測定・評価を行っている。まず、端末において再生される現在時刻のユーザ間誤差を測定し、ユーザ間で $\pm 20$  nsの時刻同期精度が実現可能であることを示している。周波数同期精度については、位相雑音を実測・評価した結果、伝送特性に大きな影響を及ぼさないことを明らかにしている。以上のことから、端末単体として同期式 SS-CDMA 方式実現のための時刻・周波数同期精度が得られることを明らかにしている。これらの実験的評価は実用上極めて有用な成果である。

第 4 章では、第 3 章で評価した時刻同期精度に加え、位置情報を考慮した送信タイミング制御誤差について検討している。現状の GPS 受信機を用い測位精度を明らかにし、その測位精度を用い測位誤差による衛星到達時点での送信タイミング制御誤差を算出した。その送信タイミング制御誤差は 20 ns 以下であることを明らかにし、第 3 章で求めた時刻誤差と合わせると衛星到達時点での時間同期精度は第 2 章で求めた $\pm 56$  ns 以下であった。位置情報・時刻情報を用いた送信タイミング制御により上りリンク同期式 SS-CDMA 方式が実現可能であることを示した成果は高く評価される。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、衛星測位信号を用いた上りリンク同期式 SS-CDMA 方式を提案し、計算機シミュレーション及び実験的検討を行うことにより、QZSS を用いた安否確認用ショートメッセージ通信システムの実現性を示したものであり、無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。