

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04391

研究課題名（和文）低緯度地域における流星バースト通信実験に基づく通信性能の解明と通信路のモデル化

研究課題名（英文）Performance Analysis and Modeling of Meteor Burst Communication Channels from for Equatorial Region

研究代表者

和田 忠浩（Wada, Tadahiro）

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：00303529

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：流星が地球の大気圏に突入する際、大気との摩擦により電離気体柱（流星バースト）が発生する。流星バースト通信（MBC）は、この流星バーストによる低VHF帯電波の反射現象を利用した見直し外通信である。本課題では、赤道地域でのMBCの利用を目指し、インドネシアでMBC実証実験を行い、その通信路特性や伝送特性を明らかにすることを目的とする。さらに、MBCの性能の改善のため理論研究として、ソフトウェア無線機による受信フィルタ設計の検討、マルチレシーバシステムの信号合成方法に関する検討、流星バースト通信に適した誤り訂正符号としてPolar符号の適用に関する検討を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流星バースト通信は、大量のデータ伝送や即時性の必要なデータ伝送には適さない一方、電力を多く必要とせず太陽電池でも稼働できるため、電力インフラや通信インフラが未発達な地域で利用できる通信手法である。さらに、インフラ不要で通信ができることから、災害時における非常用バックアップとしても期待できる通信方式である。

本研究成果は、赤道付近における流星バースト通信路の性質を明らかにするとともに、ソフトウェア無線によるモデム設計、流星バースト通信の効率化を図る誤り訂正符号の適用方法などを明らかにしており、赤道地域をはじめとし、流星バースト通信の実用に向けて意義が高いものである。

研究成果の概要（英文）：When meteors enter the Earth's atmosphere, ionized gas columns are generated by friction with the atmosphere, which are called meteor bursts. Meteor burst communications (MBCs) are an over-the-horizontal communication method that utilizes the reflection of low VHF radio waves by the meteor bursts. To reveal the availability of MBCs in the equatorial region, we have conducted MBC experiments in Indonesia to clarify the characteristics of the communication link. In addition, theoretical researches to improve the performance of MBC have been conducted, including the studies of a filter design method using a software defined radio, a signal synthesis method by a multi-receiver system and an error correcting method for meteor burst communication using polar codes.

研究分野：情報通信工学

キーワード：流星バースト通信 赤道地域 ソフトウェア無線 誤り訂正符号 通信路モデル化

1. 研究開始当初の背景

流星が地球の大気圏に突入する際、大気との摩擦により電離気体柱（流星バースト）が発生する。流星バースト通信（MBC）とは、この流星バーストによる低 VHF 帯電波の反射現象を利用した見通し外通信である（図 1）。MBC システムは、最大 2000 km 離れた通信局間で、大規模なインフラを必要とせずデータ伝送を実現できる。また衛星通信に比べて極めて簡単に安価にシステムを構築できる。一方、通信に適した流星バーストは平均数分に一回程度しか発生せず、また流星バーストの存在時間も数百ミリ秒程度と短いため、即時性が必要な通信には適さない。そのため MBC は多少の遅れを問題とせず、大量のデータ伝送を必要としない、環境データ収集や気象データ収集システムなどに応用されている。さらに、MBC におけるリモート局は、電力を多く必要とせず太陽電池でも稼動できるため、電力インフラや通信インフラが未発達な地域で利用できる通信手法である。加えてインフラ不要で通信ができることから、災害時における非常用バックアップの通信手段としての利用も検討されている。

過去の MBC の応用や実験は、中緯度地域や高緯度地域で行われていた。その一方、低緯度地域において MBC の実験は過去に行われておらず、その性能は明らかになっていない。そのため、低緯度地域での MBC の性能を明らかにするため、インドネシアのガジャマダ大学、ウダヤナ大学の協力で実験局を設置し、MBC 実験を行っている。

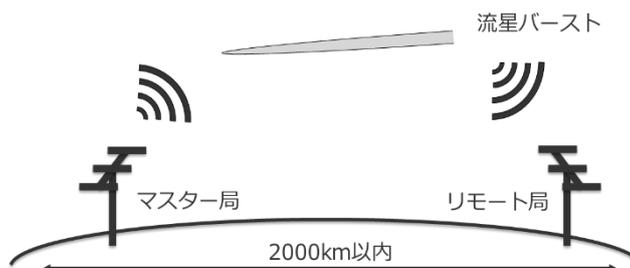


図 1 流星バースト通信の原理

2. 研究の目的

本研究では、インドネシアでの MBC 実験を継続し実験結果を得ることで低緯度地域での流星バースト通信路の性能を明らかにする。また、MBC の性能改善を図るため、複数の通信端末を用いた 1 対多型（マルチレシーバ型）の MBC システムの通信性能を明らかにする。さらに、MBC の性能改善の手法を検討し、ソフトウェア無線による受信フィルタの設計、誤り訂正符号の効果に関する研究を実施する。

3. 研究の方法

本研究課題で構築する実験局の形態はデータ収集通信局とし、データを収集する局をマスター局、データをマスター局に送信する局をリモート局と呼ぶ。本実験はインドネシアのジョグジャカルタにあるガジャマダ大学と、ジンバラン（バリ島）にあるウダヤナ大学との共同研究として実施し、ガジャマダ大学にマスター局を、ウダヤナ大学にリモート局を設置した（図 2）。利用した無線モデムは MRC565（Maidem Rock Communications 社製）で、搬送波周波数 48.375 [MHz]、ビット速度 4[kbps]、送信電力を 100[W] と設定した。アンテナは 3 素子八木アンテナとし、その仰角を 18[°] とした（図 3）。

本実験に加えて、流星バースト通信の性能改善のために、ソフトウェアモデムに基づくシミュレーションや数値解析、コンピュータシミュレーションに基づく研究を実施した。



図 2 インドネシアの実験場所



図 3 実験局の写真（左：ジョグジャカルタ、右：ジンバラン）

4. 研究成果

(1) 流星バースト通信システム送受信のための受信フィルタの設計

MBC では流星バーストの継続時間が極めて短いため、それに応じた同期法や伝送路変動に柔軟に対応できる変調方式などが必要となる。このような用途において、ソフトウェア無線機(SDR)の利用は MBC にとって有効であると考えられる。本検討では、SDR を用いた MBC 用受信フィルタとして RRC フィルタの設計を行った。RRC には直線位相特性が要求されるため、その実装には有限インパルス応答 (FIR) のフィルタが必要となる。しかし、通常の FIR フィルタ構成では多数の積和演算が必要となり、特に、MBC の受信システムにおいては、一つの流星バースト伝送路の継続時間内に一連の伝送手順を完結させる必要があり、遅延時間の増加は伝送性能を大きく低下させる恐れがある。そこで、本課題では受信側 RRC フィルタの実現方法として、少ない演算量で FIR フィルタを実現できる CR-FIR フィルタ構成を提案した (図 4)。本構成のフィルタで生成したインパルス応答を図 5 に示す。本図のように、提案方式を用いることで良好な RRC 特性を得られることを確認した。

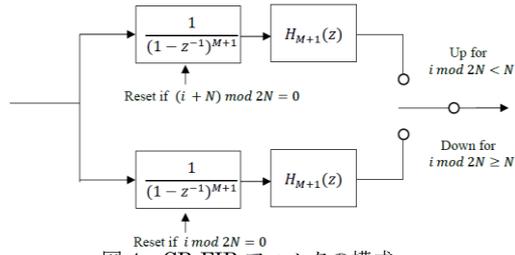


図 4 CR-FIR フィルタの構成

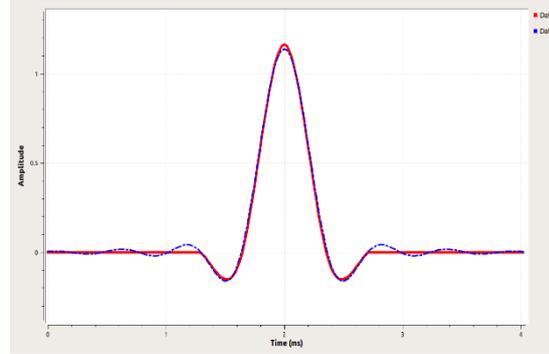


図 5 CR-FIR による RRC のインパルス応答

(2) マルチレシーバシステムにおける受信特性の検討

流星バースト通信では、流星バーストが発生しやすい空域をホットスポットと呼んでいる。図 6 に示すように、ホットスポットは送受信局の直線上より左右にずれた位置に発生するとされている。このようなホットスポットによる反射波の効率的な受信のため、マルチレシーバシステムが有効であると考えられる。本検討では最も基本的な 2 つのアンテナを用いた 2 受信システムにおける性能評価をコンピュータシミュレーションによって実施した。その結果を図 7 に示す。本研究では、2 受信システムの信号合成方式として、個別受信方式、軟値合成方式、対数尤度比合成方式を提案した。本図より、いずれの方式も 1 アンテナを用いた単受信機システムより特性が改善していることが確かめられた。三つの方式を比較すると、個別受信方式では、方位角が流星バーストの反射点分布の中央方向である 20° 近傍の受信率が最も高いことが分かる。一方、軟値合成方式と対数尤度比合成方式では、両アンテナの角度を 0° と送信アンテナと対向させた場合の受信率が最も高いことが分かる。さらに、個別受信方式と軟値合成方式を比較すると、方位角が小さい場合、軟値合成方式の受信率が高いが、角度が大きくなると性能が入れ替わり個別受信方式の性能が高くなることが分かる。個別受信方式は複雑さが最も低く、適切な方位角を設定することで十分な性能が得られることが確認できた。

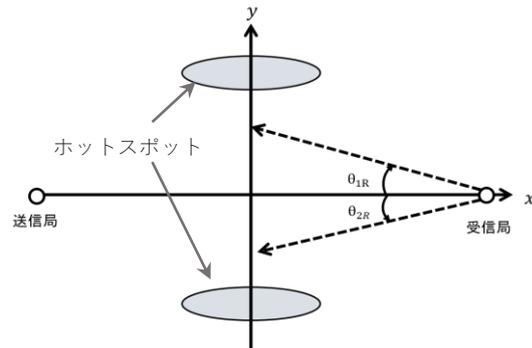


図 6 流星バースト通信のホットスポット

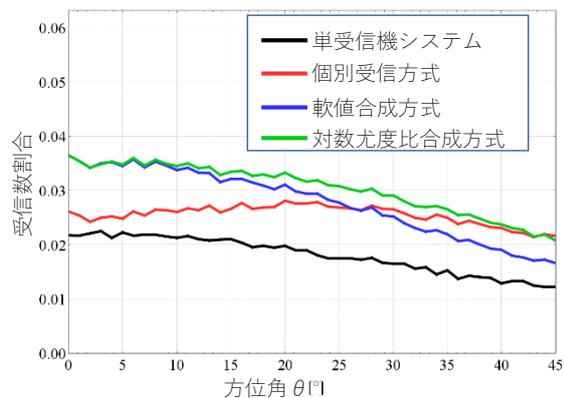


図 7 2 受信システムにおける受信性能

(3) 流星バースト通信への Polar 符号の適用による特性改善

流星バースト通信は、受信信号電力が極めて低く、さらに伝送時間が極めて短いことから、流星バースト通信に適した誤り訂正符号を適用することで、通信性能の改善が期待できる。そこで、本研究では、流星バースト通信に Polar 符号を適用することを検討する。流星バースト通信のデ

一タ伝送プロトコルを図8に示す。本プロトコルにおいて、流星バースト通信を成立させるために、プローブパケット (PP)、データパケット (DP)、確認応答パケット (AP) の3種類のパケットの伝送の成功が必要となる。特に、APの受信を成功させることが性能に寄与するため、APにPolar符号を適用することを考える。Polar符号化の際には、凍結ビットと呼ばれる送受信機間で既知のビットを設定する必要がある。このプロトコルの場合、送受信機間のIDやシリアルナンバーをそのままPolar符号の凍結ビットとして用いることができ、効率の良い符号化が実現できる。図9は、Polar符号化APを用いたときの通信性能をブロック誤り率 (BLER) で示したものである。本図に示すように、Polar符号化を適用したことで、BLER特性が極めて改善することを確認した。

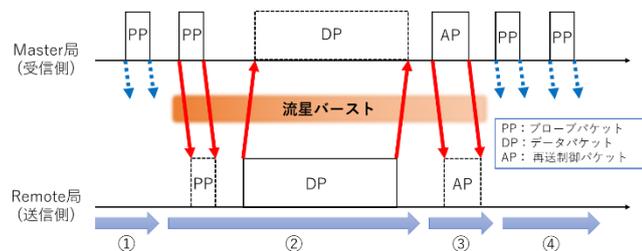


図8 流星バースト通信プロトコル

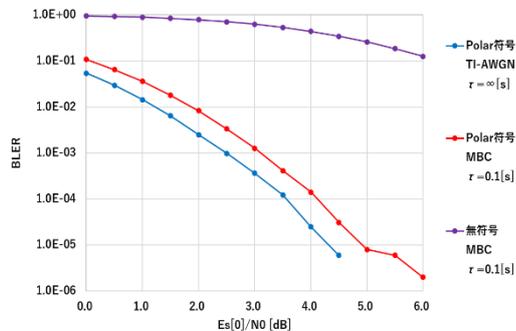


図9 Polar符号化APの性能評価

(4) インドネシア実験に基づく通信路雑音特性と通信性能の調査

本課題では、インドネシアにおけるMBC通信実験により、通信路のモデル化で必要となる低緯度地域の雑音環境ならびにパケット伝送状況について調査を行った。観測期間を2023年5月から8月とし、その期間の雑音を1時間毎に測定した。図10は、リモート局の各日における24時間の雑音の変動をプロットしたものである。図中のWIBはインドネシア西部時間を示す。本実験の結果、リモート局の雑音の最低値が -120 dBm、最大値が -98 dBmであり、日中は雑音電力が少なく、夜間の雑音電力が大きい日変動の様子が観測された。また雑音の季節変動も観測され、5月末から6月中旬の間は雑音変動が比較的落ち着いている一方で、他の期間では変動が大きくなっている様子が分かった。過去の気象学的な観測より、赤道地域では夜間の空電現象により10MHz帯での空電の影響が夜間の雑音増加に寄与しているとの結果があり、本課題でもその影響が雑音変動の一因と考えられる。図11に示すパケット伝送状況を確認すると、他地域では通常、流星の発生数が多いとされる明け方から午前中に多くのパケット伝送が見られるのに対して、本実験では日中 (午前から午後にかけて) に多くのパケット伝送が見られた。この結果より、流星の発生数よりも雑音のパケット伝送に影響することが考えられる。雑音環境の観測については、中緯度地域である沖縄でも実施した(2023年10月)が、インドネシアで見られたような雑音の日変動が観測されなかったため、インドネシア実験で観測された雑音の日変動が赤道地域特有の現象である可能性が示唆された。

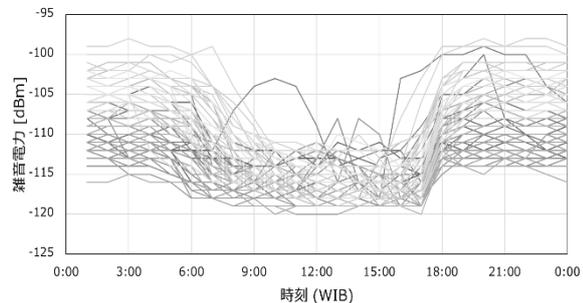


図10 リモート局の雑音測定結果

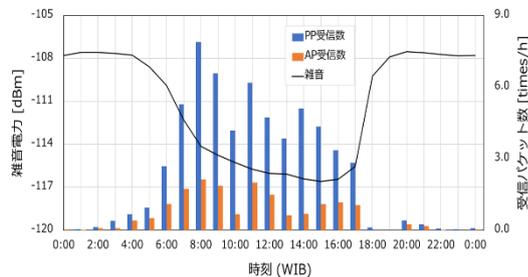


図11 リモート局のパケット受信結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平塚 侶米和, 椋本 介士, 和田 忠浩, I Wayan Mustika, Linawati
2. 発表標題 インドネシア流星バースト通信実験における周辺雑音が受信特性に与える影響の調査報告
3. 学会等名 電子情報通信学会 2024全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岩崎寛人, 椋本介士, 和田忠浩
2. 発表標題 流星バースト通信路モデルに基づく回線設計手法に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岩崎寛人, 椋本介士, 和田忠浩
2. 発表標題 流星バースト通信における伝送路モデルの改良とインドネシア実証実験結果の比較
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加山巧, 椋本介士, 和田忠浩
2. 発表標題 流星バースト通信へのマルチレシーバシステムの適用に関する一考察
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林暁、棕本介士、和田忠浩
2. 発表標題 流星バースト通信のためのPolar符号化再送制御パケットの提案
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大森森春、棕本介士、和田忠浩
2. 発表標題 GNURadioを用いた流星バースト通信用無線機におけるRRCフィルタの実現について
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田忠浩、棕本介士、佐藤瑞起、I Wayan Mustika、Linawati
2. 発表標題 赤道地域と南極地域の流星バースト通信特性の比較
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤寛文、棕本介士、和田忠浩
2. 発表標題 流星バースト通信への適用のためのLDPC符号に関する一考察
3. 学会等名 電子情報通信学会2020年総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	棕本 介士 (Mukumoto Kaiji)		
研究協力者	アイ ワヤン ムスティカ (I Wayan Mustika)	ガジャマダ大学	
研究協力者	リナワティ (Linawati)	ウダヤナ大学	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
インドネシア	ガジャマダ大学	ウダヤナ大学	