

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630173

研究課題名(和文) 衛星可視光通信の伝搬環境と簡易装置による昼夜通信の検討

研究課題名(英文) A study on night/daytime visible light communications and transmission properties of visible light signals between the satellite and the earth

研究代表者

半田 志郎 (HANDA, Shiro)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：00156530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：信州大学が2014年2月に打ち上げた人工衛星「ぎんれい」からの、可視光通信信号を地上で受ける実験を行った。準備の整った2014年7月以降、長野市上空を通過し、天候が良好な場合には必ず受信を試みた。同時に光学カメラで光学的にもLEDの発光の痕跡を観察した。その結果、光学的にも電気的にも痕跡を捉えることは出来なかった。原因としては、衛星の姿勢制御ができておらず、光軸が一度も合なかつたためと考えられる。「ぎんれい」は、大気圏に再突入して寿命を全うした。それ以降は、地上実験を基に可視光通信における信号の伝搬特性について、主に振幅揺らぎの統計解析とそれに基づく伝搬の数学的モデルの作成を行った。

研究成果の概要(英文)：Experiments were conducted to receive visible light communication signals on the ground from the artificial micro-satellite "Ginrei" which was launched by Shinshu University in February 2014. Trials of receiving the signals were carried out whenever the satellite passed through the sky of Nagano City and the weather was good. Traces of the LED light emission were simultaneously observed by the optical camera. As a result, they were not able to capture either electrically or optically. The posture of the satellite was not able to be controlled and then the optical axis was not seemed to be directed to the point on earth even once. "Ginrei" re-entered the atmosphere and was fulfilled its lifetime.

Thereafter, the experiments were carried out on the ground. The propagation characteristics were studied and the received signals of visible light communications were modeled mathematically about the amplitude fluctuations.

研究分野：情報通信工学

キーワード：可視光通信 衛星通信 ぎんれい 伝搬特性

## 1. 研究開始当初の背景

信州大学では、平成 26 年 2 月に「可視光通信実験衛星」「ぎんれい」を H A ロケットによって打ち上げた。衛星は、約 400km 上空を飛行し、約 90 分で地球を一周する。地球上の 1 点から観測する場合は、約 10 分程上空にいる。この衛星から、LED を点滅させることにより、可視光信号が送られてくる。当初計画では、1.5m 級の望遠鏡を用い、太陽光の影響を避けるため、可視光通信実験は条件の良い夜間のみ限定している。1m を超える望遠鏡は、国立天文台等日本国内には数台程度しかなく、それらを借りるなどしても観測機会はかなり限定されてしまう。また、それらの望遠鏡は殆どが反射型望遠鏡であり、筒内の空気温度が外気と同じになるまでに時間がかかり、ドームを開けてから数時間しないと高精度の観測ができないなどの制約もある。

そこで、30 cm 以下の口径の望遠鏡でも受信の可能な方法を考案すれば、条件の良い場所に移動して観測することが可能となり、さらに、昼間でも受信可能な機構を考案すれば実験機会は 2 倍になる。これらのことにより、将来的にも可視光通信の用途が広がる。口径が 30cm 以下の望遠鏡であれば、1m 程度の円筒を付けることで太陽光を遮断して、昼夜を問わず可視光通信実験が可能となる。望遠鏡口径を当初計画より小さくした影響を補償するため、光電変換の効率を高めた高性能アバランシェ・フォトダイオードを採用する。

## 2. 研究の目的

可視光通信は、電気信号光変換 光伝搬 - 光電変換と、光を介した電気信号の伝播と考えた場合、最終的に得られる電気信号の電力は、伝送距離の 4 乗に比例して減衰してしまい、超長距離伝送には大きな困難が伴う。なぜなら、光電変換は、光の振動性を利用しているわけではなく、光子のエネルギーによって電流を発生しているため、光パワーが電流に変換され、電気的な信号電力は伝搬距離の 4 乗に比例して減衰してしまうのである。これを補うためには、送信電力を大きくする、または光パワーを沢山集めるために大口径の望遠鏡を用いる必要がある。

設計では、衛星で発生できる太陽光電力を勘案して限界近いトータル電力(約 80W)で LED を駆動することにした。また、地上での受光では約 1m から 1.5m の大口径の望遠鏡での受光を検討していた。日本で使える 1m 級以上の望遠鏡は数台に限られており、それらを借用する計画もあったが、信州大学でも独自に、1.5m パラボラアンテナに鏡を貼り付けて受光することも計画した。

受光器が太陽の強い光を受けるとフォトダイオードが飽和してしまうため、昼間に実験をしようとする太陽光を遮蔽する円筒

等を望遠鏡に設置しなければならない。しかし、衛星は約 90 分で地球を一周する速度で周回しているため、追尾する必要があり、口径が 1m 以上ある望遠鏡に、ある程度長い円筒を取り付けるのは事実上不可能である。

本研究では、アバランシェ・フォトダイオードを用いて以上の困難を解消し、受信実験を行うと共に、超長距離の可視光通信の伝搬環境を詳細に検討することを目的とした。本課題の実験前、数種の 10~30cm 級の望遠鏡を用い、数 10m~1km 程度の伝搬距離で実験結果を蓄積しており、送信電力、望遠鏡口径、伝搬距離、揺らぎなどについての特性は、ほぼ解析できており、上術した検討はこれらに基づいている(中長距離可視光通信の統計的伝搬モデルの実験的検討, H25 電子情報通信学会信越支部大会 3B-1, p.40)。それらの検討の中で、開発期間の制限からアバランシェ・フォトダイオードの検討はできておらず、100 倍程度の電子増倍が可能であれば、1m 級の望遠鏡が 10cm 級で済み、望遠鏡に遮光円筒を設けて追尾することも可能となることが判明した。また、昼間でも実験が可能となり、移動も簡単なことから、実験機会が 2 倍以上になる可能性があった。超小型衛星の寿命は 1 年から 2 年であり、この間にできるかぎり多くのデータを集積する必要があった。また、この実験が成功すると、簡易な装置で可視光通信が可能となり、可視光通信の利用範囲が格段に広がると共に、衛星搭載用の通信設備が、事前に無線免許申請をする必要がなくなり、超小型衛星開発の大幅な短期間化も可能となる。

## 3. 研究の方法

(1) 衛星追尾の可能なコンピュータ・コントロール経緯台を用いて、衛星追尾が可能であることを確認する。なお、望遠鏡は直径 20 cm の反射望遠鏡とした。理由は後に太陽光遮光のための円筒を付け易いことと色収差等がないことによる。本格的な追尾の前段階として、国際宇宙ステーションが夕方及び明け方に太陽光に照らされて明るく見えるため、これを目標に追尾可能となるよう調整を行った。

(2) 可視光受信装置の製作。通常のフォトダイオードと増幅器を組み合わせた物と、アバランシェ・フォトダイオードを用いた物の 2 種類を製作した。

(3) 地上実験を行い、どの程度の受信電力が可能かの推定を行った。また、距離特性、受信電力の揺らぎ特性を取得した。

(4) “ぎんれい”の主点灯が行われる日を選んで受信実験を行った。主点灯が行われた場合には約 1 等星以上の明るさで点灯することが分かっていたので、通常のカメラでの追尾も併せて行った。

(5) 衛星が大気圏に再突入して消滅した後、地上実験で得られたデータから、可視光通信における信号伝搬の数学的モデルの検討を行った。

#### 4. 研究成果

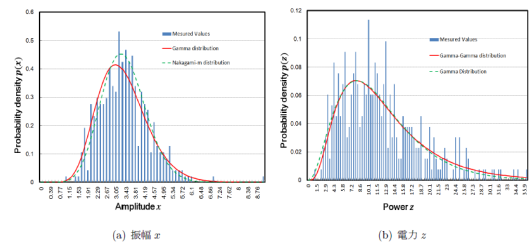
(1) 一般的な経緯台は通常の星を追尾する用途で作られているため、地上 400km 程度の高度を高速に周回する人工衛星を追尾する精度は高くなく、様々のパラメータを設定することにより望遠鏡の視野に入る程度の精度を確保できたと思われる。

(2) およそ 4 か月間で 15 回にわたり、受信実験を行ったが、衛星からの可視光は電気的にも光学的にも受信できなかった。この結果について考察する。実験準備が整った 7 月以降、日本上空を通過し、主点灯が行われた場合は毎回受信を試みたが、スペクトル・アナライザでの受信信号の痕跡すら見出すことはできなかった。同時に主点灯時には、目視でも衛星の確認が可能との事であったので、通常の高感度カメラでの撮影も行っていたが、光学的にも捉えることはできなかった。なお、このカメラは、6 等星位の星も充分捉えることが可能であるため、たとえ移動しているとしても捉えられた可能性は十分にあったと想定される。

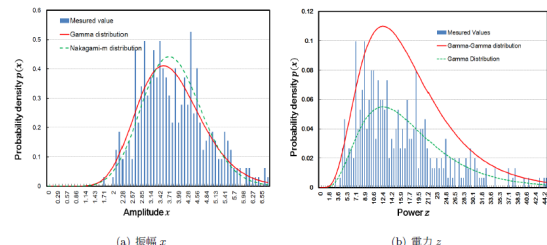
原因として考えられることは、姿勢センサの不調(テレメトリデータより確認されている)により、衛星の姿勢制御がまったく出来ておらず、衛星は沿磁力線制御の状態になっていたこと、及び衛星が首振り運動の状態であったことにより、発光が行われていたとしても、地上局には一瞬だけ光軸面を向けるだけで過ぎ去っていったため、気候等の条件が良くても受信には至らなかったものと考えられる。なお、沿磁力線制御とは、衛星の磁場通路が地球磁力線の方角に向くことである。ただし、磁場通路に方向性はなく、まったく逆の方角になってしまっていた可能性もあり、その場合は宇宙の方角を照らしていたことも考えられる。

#### (3) 受信可視光信号の振幅分布の検定

以前の実験において、特定の周波数(3.5MHz)の正弦波の可視光伝送について、受信電力は距離の 4 乗に反比例して減衰すること、及び、信号振幅の揺らぎについては距離と共に大きくなることは確認できていた。受光回路の帯域幅の全域について同様の検討を行い、振幅及び電力の分布について、同様の結果が得られることを確認した。なお、分布の検定には 2 標本 K-S 検定を用い、優位水準 1% において、振幅については仲上-m 分布、電力については Gamma 分布となっていることが確認できた。その一例を図 1 に示す。



(a)7MHz 正弦波の可視光伝送



(b)9MHz 正弦波の可視光伝送

図 1. 振幅及び電力の分布特性

#### (4) 伝搬モデルの検討

今回の実験では、一定の周波数の正弦波で可視光を強度変調して伝送し、PD で受信している。これをモデル化するにあたり、通常電波伝搬における数学的モデルが参考になる。しかし、電波伝搬と異なるところは、以下の 2 点である。

- ・送信、受信共前方のみへの放射、受光であり、その範囲もかなり限定されている。
- ・反射が何処でも起こるわけではなく、空気層等での散乱屈折程度であると考えられること

以上のことを考慮して、図 2 のように範囲が限定された散乱波と直接波の合成波について、入射角の広さに応じてどのような計算機シミュレーションを行った。受信信号の振幅分布については、K-S 検定に基づき仲上-m 分布となること、入射角の範囲が狭くなるに従って振幅範囲が狭くなることを確認できた(図 3)。これは、散乱波が距離が遠くなるほど広角になることに相当し、実験結果に相応していると考えられる。

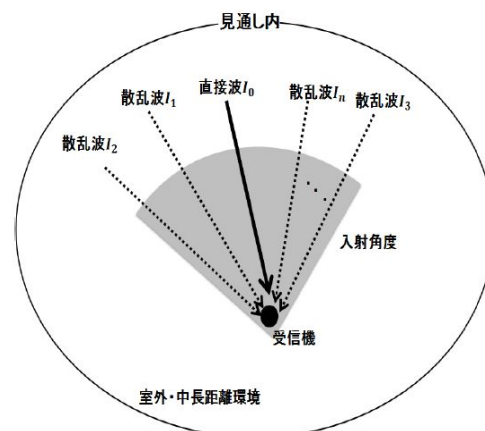


図 2. 受信機に到来する光の受信モデル

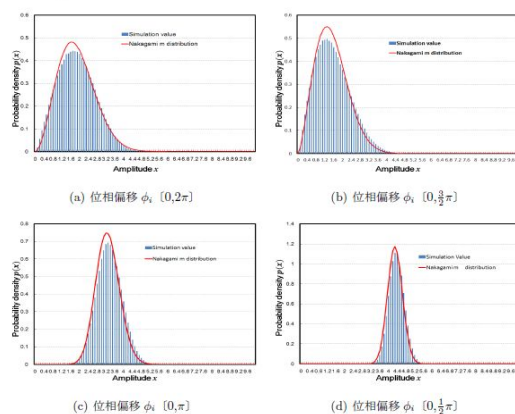


図3. 可視光伝搬モデルに基づく受信信号の振幅分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 3件)

S.Yoshizawa, S.Handa, F.Sasamori, O.Takyu; “ A simple but effective approach for visible light beacon-based positioning systems with smartphone,” Proc. 2016 IEEE 12th International Colloquium on Signal Processing & its Applications (CSPA2016), Malacca, Malaysia, 査読あり, 2016, 32-35.

吉澤信吾, 半田志郎, 笹森文仁, 田久修; “ 可視光ビーコンを用いた位置情報取得システムの検討”, 電子情報通信学会信越支部大会, 柏崎市, 7C-1, 2015  
樋口和俊, 半田志郎, 田久修, 笹森文仁; “ 中長距離可視光通信の統計的伝搬モデルの実験的健闘”, 電子情報通信学会信越支部大会, 長野市, 5A -2, 2014

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

半田 志郎 (HANDA, Shiro)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号: 00156530