

3tone 信号を用いた複数モジュール間の無線同期方法

安藤暢彦[†] 能登一二三[†] 川上憲司[†] 佐々木拓郎[‡] 本間幸洋[‡]

[†] 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1

[‡] 三菱電機株式会社 通信機製作所 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

E-mail: Ando.Nobuhiko@ah.MitsubishiElectric.co.jp

あらまし 実験室における計測器の接続など複数のモジュール間の同期方法としてケーブルを用いた基準信号の配信が一般的である。しかし、宇宙太陽光発電システムのような大きな構造物では基準信号を有線で配信するは非現実的である。そこで、無線信号を用いたモジュール間の同期方法として、本報告では 3tone 基準信号をモジュールへ配信する方法を提案する。モジュールに搭載した同期回路において信号処理を行うことにより同一位相の基準信号を得ることが可能である。提案手法の有効性をシミュレーションおよび BBM 実験により確認した。

キーワード 宇宙太陽光発電, 無線電力伝送, 同期方法

Wireless Synchronizing Method between Modules using 3Tone Signals

Nobuhiko Ando[†] Hifumi NOTO[†] Kenji KAWAKAMI[†] Takuro SASAKI[‡] Yukihiro HOMMA[‡]

[†] Mitsubishi Electric Corporation, Information R&D Center, 5-1-1 Oofuna, Kamakura, Kanagawa, 247-8501 Japan

[‡] Mitsubishi Electric Corporation, Communication System Center, 8-1-1 Tsukaguchi-Hommachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661 Japan

E-mail: Ando.Nobuhiko@ah.MitsubishiElectric.co.jp

Abstract Synchronizing method between modules using wired line is well known and widely used. But, it is difficult to adapt for huge construct like Solar Power Station/Satellite. We propose a novel synchronizing method between modules using 3tone signals. 3tone signals is transmitted from master transmitter. The synchronizing circuit in the modules outputs same phase signal by digital signal processing. In this paper, we confirmed the new synchronizing method is available by simulation and an examination. It is found out that the accuracy of the proposed system is within Insec by the examination.

Keyword Solar Power Station/Satellite, Microwave Power Transmission, Synchronize Method

1. はじめに

時刻同期やタイミング同期が必要なアプリケーションとして大型構造物の構造ヘルスマニタリング[1]や宇宙太陽光発電システム(Solar Power Station/Satellite: SPS) [2]などがある。構造ヘルスマニタリングでは、多数のセンサを用いて構造物の振動の様子を観測する。センサは同一時刻の事象を観測する必要があるため、各センサは同期して動作する必要がある。また、SPS は宇宙空間で発電したエネルギーをマイクロ波で地上に送電するシステムである。SPS は個別の信号源を保有する多数の RF モジュールから構成されるため、効率的な送電を行うためには、各モジュールが同期して動作する必要がある。従来の同期方法とし

てケーブルを用いた方法が知られているが、構造物が大きくなるとケーブルの引き回しが困難となる。また、近年では GPS を用いたモジュール間同期方法がある[3]。GPS 信号は同期精度が高いが、地下など GPS 信号が受信できない場所には適用できない欠点がある。

本報告では、設置場所に制約がなく、ケーブル等の引き回しが不要な無線信号を用いたモジュール間の同期方法を提案する。提案手法では同期信号として周波数の異なる 3 つの CW(Continuous Wave)信号(3tone 信号)を信号源から送信し、モジュールに搭載された同期回路において信号処理を行うことにより同一位相の信号を得るものである。今回、シミュレーションおよび BBM 実験を実施し、提案手法の有効性を確認した。

2. 同期方法の動作原理

図1に提案する同期方法の概略図を示し、図2にモジュールに搭載する同期回路のブロック図を示す。提案する同期回路は乗算器、通過特性の異なる帯域通過フィルタ (Band Pass Filter : BPF), 位相共役回路, 位相検出器および移相器から構成される。

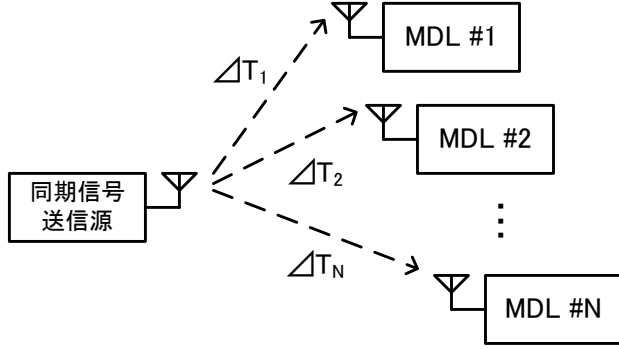


図1 同期方法の概略図

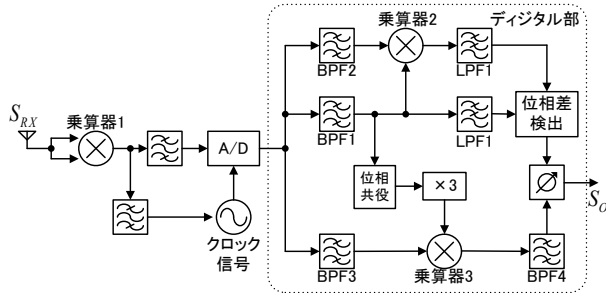


図2 同期回路のブロック図

提案方法では、まず同期信号送信源より 3tone 信号 $s_{TX}(t)$ を送信する。

$$s_{TX}(t) = \cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) + \cos(\omega_3 t) \quad (1)$$

ここで、 $\omega_1 = \omega_0 - \Delta\omega$, $\omega_2 = \omega_0$, $\omega_3 = \omega_0 + 2\Delta\omega$ である。

同期信号送信源からモジュールへ信号が伝達する時間を ΔT_M とすると、モジュール M で受信する信号 $s_{RX}(t)$ は

$$s_{RX}(t) = \cos(\omega_1 t - \phi_{M1}) + \cos(\omega_2 t - \phi_{M2}) + \cos(\omega_3 t - \phi_{M3}) \quad (2)$$

と表される。ここで、 $\phi_{M1} \sim \phi_{M3}$ は伝達時間 ΔT_M に応じた位相回転量を表し、 $\phi_1 = \Delta T_M \omega_1$, $\phi_2 = \Delta T_M \omega_2$, $\phi_3 = \Delta T_M \omega_3$ であり、信号電力の増減は無視する。

同期回路では受信信号 s_{RX} から乗算器1と低域通過フィルタ (Low Pass Filter : LPF) を用いてベースバンド信号を抽出する。ここで乗算器1の出力信号 S_{MIX} は

$$\begin{aligned} S_{MIX} = S_{RX}^2 = & \cos\{2(\omega_1 t + \phi_{M1})\} + \cos\{2(\omega_2 t + \phi_{M2})\} + \cos\{2(\omega_3 t + \phi_{M3})\} \\ & + \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + \phi_{M1} + \phi_{M2}\} + \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_{M1} - \phi_{M2}\} \\ & + \cos\{(\omega_2 + \omega_3)t + \phi_{M2} + \phi_{M3}\} + \cos\{(\omega_2 - \omega_3)t + \phi_{M2} - \phi_{M3}\} \\ & + \cos\{(\omega_1 + \omega_3)t + \phi_{M1} + \phi_{M3}\} + \cos\{(\omega_1 - \omega_3)t + \phi_{M1} - \phi_{M3}\} \\ & + V_{DC} \end{aligned} \quad (3)$$

と表されるので、周波数特性の異なる BPF を用いて周波数差に応じたベースバンド信号を抽出すると、BPF1 から BPF3 の出力信号は

$$S_1(t) = \cos(\Delta\omega_1 t + p_{M1}) \quad (4)$$

$$S_2(t) = \cos(2\Delta\omega_1 t + p_{M2}) \quad (5)$$

$$S_3(t) = \cos(3\Delta\omega_1 t + p_{M3}) \quad (6)$$

と表される。なお、 $p_{M1} = \phi_{M2} - \phi_{M1}$, $p_{M2} = \phi_{M3} - \phi_{M2}$, $p_{M3} = \phi_{M3} - \phi_{M1}$ である。

次に BPF1 の出力信号 S_1 と BPF2 の出力信号 S_2 を用いて乗算器2の出力信号 S_2' を求めると

$$S_2'(t) = \cos(\Delta\omega_1 t + p_{M2} - p_{M1}) \quad (7)$$

と表される。さらに、位相差検出回路において信号 S_1 と信号 S_2' の位相差 $\Delta\phi$ を求めると

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= p_{M2} - 2p_{M1} \\ &= \phi_{M3} - 3\phi_{M2} + 2\phi_{M1} \end{aligned} \quad (8)$$

が得られる。

一方、信号 S_1 は位相共役回路に入力され、その出力信号 S_1' は

$$S_1'(t) = \cos(\Delta\omega_1 t - p_{M1}) \quad (9)$$

となるため、3 乗倍器の出力信号 S_1'' は

$$S_1''(t) = \cos(3\Delta\omega_1 t - 3p_{M1}) \quad (10)$$

と表される。従って、乗算器3の出力信号 S_3' は

$$\begin{aligned} S_3'(t) &= \cos(6\Delta\omega_1 t + p_{M3} - 3p_{M1}) \\ &= \cos(6\Delta\omega_1 t + \phi_{M3} - 3\phi_{M2} + 2\phi_{M1}) \end{aligned} \quad (11)$$

と表される。式(10)で表される信号 S_3' の位相を式(8)で表される位相 $\Delta\phi$ を用いて変化させると移相器の出力 S_O は

$$S_O(t) = \cos(6\Delta\omega_1 t) \quad (12)$$

と表すことができ、時間 ΔT_M に無関係な信号が得られる。式 (12) で表される信号を同期信号に用いることによりモジュール間の同期を取ることが可能となる。

提案回路では回路の一部をデジタル回路で構成する。これは位相共役回路や BPF などアナログ回路で構成すると特性のばらつきによりモジュール間の同期精度が劣化するためである。デジタル回路を使用するためには、モジュール間において同一周波数のクロック信号が必要となる。しかし、一般に複数のモジュールに搭載されたクロック信号は非同期であるため、その周波数にはわずかな誤差がある。そこで、提案回路ではベースバンド信号に変換した信号から BPF を用いて 1 波を抽出し、抽出した信号を基準信号として PLL(Phase Locked Loop) 回路によりクロック信号を生成する。これによりモジュール間で周波数が同一のクロック信号を生成することが可能である。

3. シミュレーションによる原理確認

本章では、シミュレータを構築し提案手法の効果を確認した。図 3 にシミュレータの概略図を示す。同期信号送信源とモジュール間の距離を変化させ、ある基準点からの伝搬遅延時間 ΔT に対する同期回路の位相を求めた。図 4 に遅延時間と同期信号の位相の関係を示す。同期回路中の BPF の出力信号の位相は遅延時間に応じて変化するが、同期回路の出力信号の位相は、常に一定となることが確認できた。

次に同期回路中の A/D 変換器における量子化誤差が同期精度に与える影響を求めた。図 5 に量子化ビット数に対する同期信号の精度を示す。図より量子化ビット数が 12 ビット以上あれば量子化誤差の影響はほとんどないことがわかった。

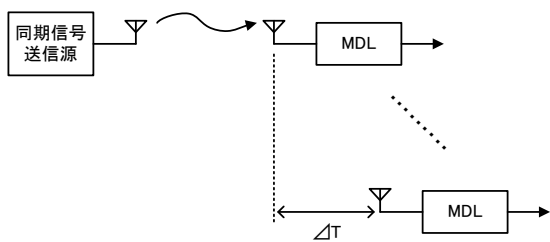


図 3 シミュレータの概略図

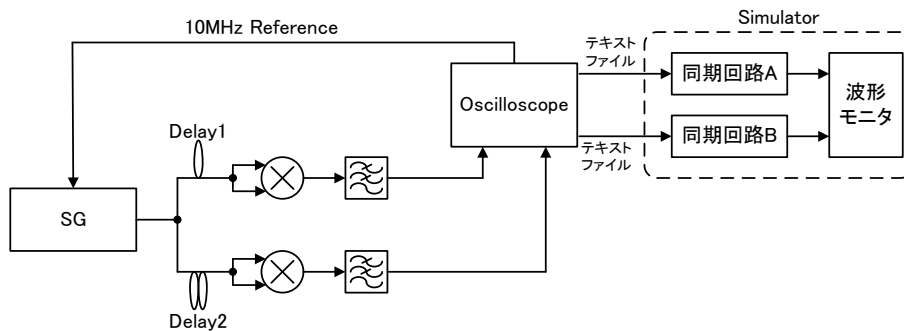


図 6 BBM 実験系

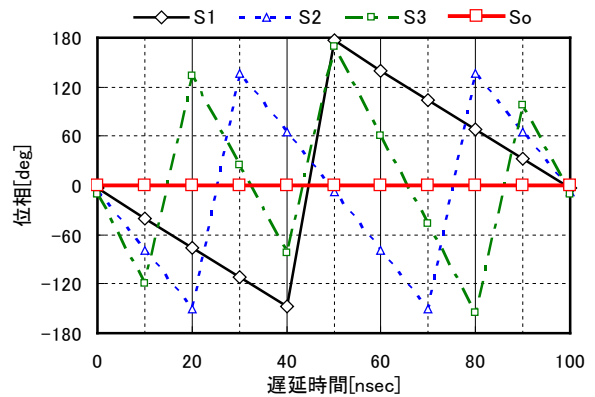


図 4 遅延時間と同期信号の位相の関係

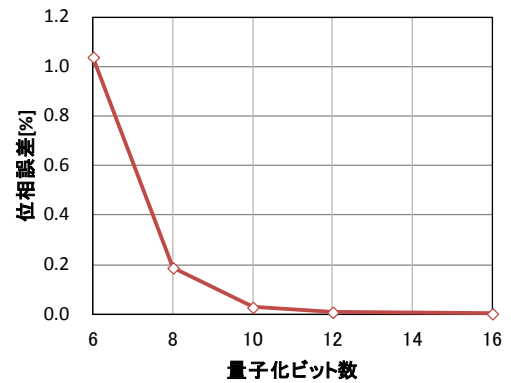


図 5 量子化ビット数に対する同期信号の精度

4. 計測器とシミュレータの組み合わせによる原理確認

3 章ではシミュレータを用いて提案手法の有効性を確認したが、本章では計測器とシミュレータを組み合わせた BBM 実験を行い、原理検証を行った。図 6 に BBM 実験系を示す。同期回路へ入力される信号の遅延時間が異なるようにするため、長さの異なるケーブルを用いた。提案回路の一部はデジタル回路を用いて構成されるため、デジタルライザとしてオシロスコープを使用する。デジタル化後の信号はテキストデータとして保存し、シミュレータ上で再現した。シミュレータ上で 2 つの同期回路を構築し、出力波形をモニタした。

3tone 信号は SG (Agilent Technology 社製 E4438C) から出力させ、分配器とケーブルを介して乗算器 (Analog Devices 社製 ADL5391) に入力する。3tone 信号の周波数はそれぞれ、995.83MHz, 1000MHz, 1008.3MHz である。図 7 は SG から出力される 3tone 信号のスペクトラムである。 ($\Delta f=4.17\text{MHz}$)

図 8 に同期回路の入力信号波形を示す。ケーブル長の違いにより約 30nsec の遅延時間差が発生していることが確認できる。

図 8 に示す信号をデジタル化し、シミュレータ上に構築した同期回路に入力し、同期回路の出力波形をモニタした。図 9 に同期信号の出力信号波形を示す。図より 2 つの同期回路間において約 1nsec の精度で同期がとれることが確認できた。

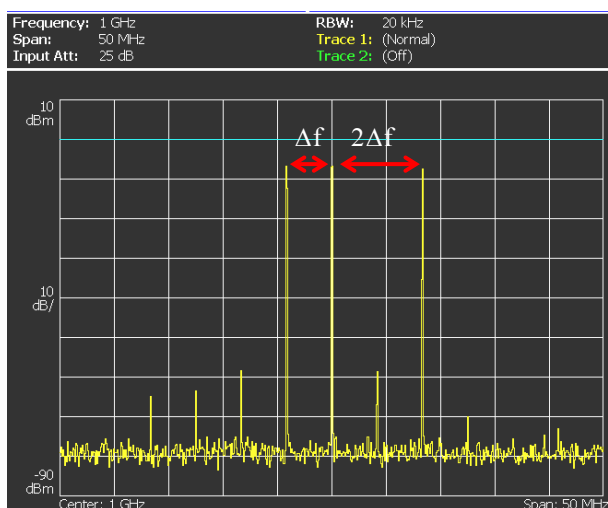


図 7 3tone 信号のスペクトラム

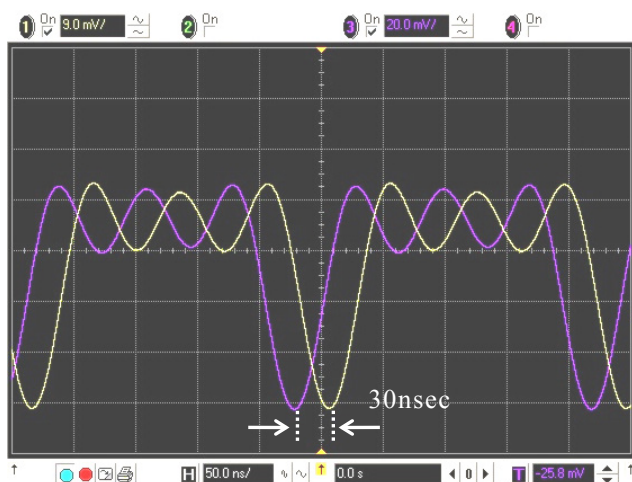


図 8 同期回路の入力信号波形

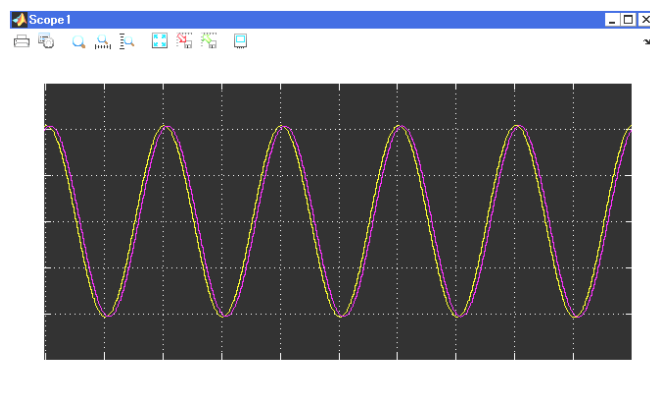


図 9 同期回路の出力信号波形

5. まとめ

3tone 信号を用いたモジュール間の無線同期方法を提案した。シミュレーションにより提案手法の有効性を確認し、実験により約 1nsec の精度で同期可能であることを確認した。今後、デジタル信号処理部を FPGA 等に実装して原理検証を行う。また、将来の SPS における複数のマイクロ波送電モジュールによる送電システムを想定して、複数の送電部に本無線同期方法を利用した複数送電部による送電実証実験を行う予定である。

謝辞

本研究では、「京大大学生存圏研究所マイクロ波エネルギー伝送実験装置 平成 24 年度共同利用研究」を通じて、京都大学 A-METLAB の設備を利用して、最終的な実証試験を行うことを予定しています。

参考文献

- [1] 岩城英朗, 岡田敬一, 白石理人, 柴慶治, 三田彰, 武田展雄, “制震・免震構造物へのヘルスマニタリングシステムの適用,” JCOSSAR2003 論文集, 583-590, 2003.
- [2] 太陽光発電利用促進技術調査 (SSPS(宇宙太陽光発電システム)プロジェクト), 財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構, 平成 19 年.
- [3] 森安雄平, 小池義和, 塩生駿, 吉澤和貴, 北条晴正, “GPS 時刻同期を用いた広範囲の音圧測定,” GPS/GNSS シンポジウム, 2012.
- [4] 安藤暢彦, 川上憲司, “3 Tone 信号を用いたモジュール間の無線同期方法,” 電子情報通信学会 総合大会, 2012.
- [5] 安藤暢彦, 能登一二三, 川上憲司, “3 Tone 信号を用いたモジュール間の無線同期方法におけるサンプリング誤差の影響,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2012.