

# MCU を用いた流星バースト通信用 MSK 変調器の試作

## A Prototype of MSK Modulator for Meteor Burst Communication Using MCU

○鈴木 杜人 (産技高専) 若林 良二 (産技高専) 高崎 和之 (産技高専)

Morito SUZUKI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minamisenju, Arakawa-ku, Tokyo 116-0003

Ryouji WAKABAYASHI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minamisenju, Arakawa-ku, Tokyo 116-0003

Kazunori TAKASAKI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minamisenju, Arakawa-ku, Tokyo 116-0003

### 1. はじめに

流星バースト通信 (MBC: Meteor Burst Communication) は、流星が大気圏に突入する際に発生する、流星バーストと呼ばれる電離気体柱に、低 VHF 帯の電波が反射する現象を利用して見通し外通信を行う方式である。衛星を介さずに安価で長距離の通信が可能であることから、通信網が未発達な地域での観測データ収集や、災害時の一時的な通信手段などに利用されている<sup>(1)</sup>。MBC の変調方式として新たに MSK を用いた場合の際の効果を検討するため、MCU を用いた MSK 変調器を試作した結果について報告する。

### 2. MSK

最小偏移変調 (MSK: Minimum-Shift Keying) は、連続位相周波数偏移変調 (CPFSK: Continuous Phase Frequency Shift Keying) の一種である。CPFSK とは、位相の連続性を保ちながら、データビットの 1 と 0 に応じて 2 値の周波数信号を切り替えることで変調を行う。ここで、1 に対応した周波数信号を  $S_{\text{mark}}(t)$ 、0 に対応した周波数信号を  $S_{\text{space}}(t)$  とすると次式で表される。

$$\begin{aligned} S_{\text{mark}}(t) &= \cos(2\pi f_c t + \pi \Delta f t) \\ S_{\text{space}}(t) &= \cos(2\pi f_c t - \pi \Delta f t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $f_c$  は搬送波周波数、 $\Delta f$  は周波数偏移である。また、1 ビットの変調にかかる時間を  $T$  とすると、変調指数  $h$  は次式で表される。

$$h = \Delta f T \quad (2)$$

このとき、 $S_{\text{mark}}(t)$  と  $S_{\text{space}}(t)$  の相互相関係数  $\rho$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \rho &= \int_0^T S_{\text{mark}}(t) \cdot S_{\text{space}}(t) dt \\ &= \frac{1}{2} \int_0^T \{\cos(4\pi f_c t) + \cos(2\pi \Delta f t)\} dt \quad \& \\ &\approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(2\pi \Delta f T)}{2\pi \Delta f} \quad (\text{for } f_c \gg 1/T) \end{aligned} \quad (3)$$

周波数偏移  $\Delta f$  が大きい場合には相関係数は 0 となり直交性が成立する。直交性が成立する最小の  $\Delta f$  は  $2\pi \Delta f T = \pi$  より、 $h = 0.5$  となる。

一方で、MSK 波の生成手法には、位相偏移変調 (PSK: Phase Shift Keying) の一種である OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) と同様の手法が用いられている。OQPSK は、四位相偏移変調 (QPSK: Quadrature Phase Shift Keying) から派生した変調方式である。

QPSK は、バイナリデータを奇数番目と偶数番目で分離し、それぞれを I 軸と Q 軸の搬送波で変調する。この際の変調とは、搬送波の位相をデータが 1 なら正相に、0 なら逆相に切り替えることで行う。また、1 度の変調で生成される信号をシンボルと呼び、この QPSK では、1 シンボルに対し、2 ビットのデータを割り当てることができる。QPSK の変調信号は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} s(t) &= a_1(t) \cos(2\pi f_c t) \\ &\quad - a_0(t) \sin(2\pi f_c t) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $s(t)$  は変調信号、 $a_1(t)$  と  $a_0(t)$  はデータビット列の奇数番目と偶数番目の情報を周期  $2T$  の矩形波にした信号、 $f_c$  は I 信号に相当する第 1 項及び Q 信号に相当する第 2 項に共通する搬送波の周波数である。

OQPSK は、I 搬送波と Q 搬送波の位相シフトが同時に起こらないようにするため、I 搬送波に対し Q 搬送波の位相偏移を 1 シンボルの半周期分遅延させて与えている。

MSK は、OQPSK の I、Q 搬送波の包絡線が半周期の正弦波状となるように振幅変化を加えてから位相シフトを与えている点異なる。MSK の変調信号は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} s(t) &= a_1(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \cos(2\pi f_c t) \\ &\quad - a_0(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \sin(2\pi f_c t) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $2T$  は 1 シンボルあたりの周期である。式(5)は積和の公式を用いて下式に変形できる。

$$s(t) = \cos\left\{2\pi f_c t + b_k(t) \frac{\pi t}{2T} + \varphi_k(t)\right\} \quad (6)$$

ここで、シンボル中の 2 ビットが同じ値 ( $a_1(t) = a_0(t)$ ) のときは  $b_k(t) = +1$ 、異なるビット値 ( $a_1(t) \neq a_0(t)$ ) のときは  $b_k(t) = -1$  とする。また、 $a_1(t) = 0$  のとき  $\varphi_k(t) = \pi$ 、 $a_1(t) = 1$  のとき  $\varphi_k(t) = 0$  とする。このとき、式(6)の周波数を時間  $t$  で微分し、瞬時周波数を求めると次式のようになる。

$$f = f_c \pm \frac{1}{4T} \quad (7)$$

よって、 $\Delta f = 2/4T$  となり、式(2)を用いると  $h = 0.5$  となることが確認でき、MSK は式(2)において変調指数  $h$  を 0.5 とした場合の FSK と等価であることが分かる。Fig. 1 は、データビット列 [0,0,1,1,0,1,1,0] を MSK の変調信号に変換する過程を示している。

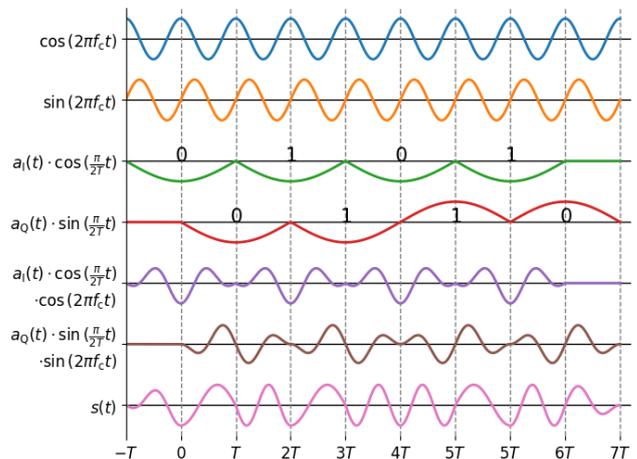


Fig. 1 Generation process of MSK signal (0,0,1,1,0,1,1,0).

### 3. システムの構成

試作した MSK 変調器の構成を Fig. 2 に示す。この変調器は、データの入力と信号処理を行う変調部、変調信号をパレールのデジタル信号からアナログ信号に変換する D/A 変換部で構成されている。変調部には、PC と通信することを考慮し、多機能な Arduino を用いた。D/A 変換部には、Arduino から出力される 8 ビットで量子化されたパレール信号を電圧信号に変換するために、ラダー抵抗を用いた回路を用いた。

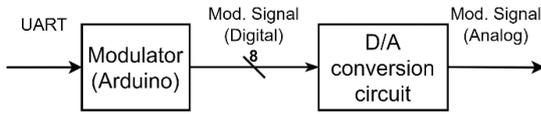


Fig. 2 Modulator by using MCU.

Arduino 内では、Fig. 3 に示す処理を行っている。まず、シリアル通信 (UART) を通して PC からバイナリデータを取得する。次に、データの奇数番目を I 軸用に、偶数番目を Q 軸用に分割する。その後、あらかじめサンプリングした MSK 用搬送波の 1 周期分のシンボルを、データの 0 と 1 で切り替えることで、I、Q それぞれの変調信号を生成する。このとき、Q 軸の処理を 1 シンボルの半周期 (T) だけ遅延させる。最後に、それぞれの変調信号を足し合わせ、パレール信号として出力する。

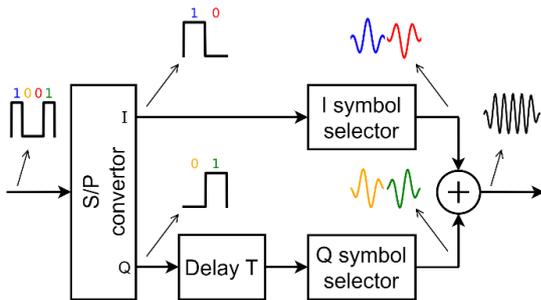


Fig. 3 Processing in MCU.

この変調器では、あらかじめサンプリングしたシンボルを、データの 0 と 1 に対応させて変調しているため、Fig. 1 に示した変調信号とは異なる変調信号が出力される。Fig. 4 は、Fig. 1 と同様のデータ列 [0,0,1,1,0,1,1,0] を試作した変調器で変調した際の過程を示している。

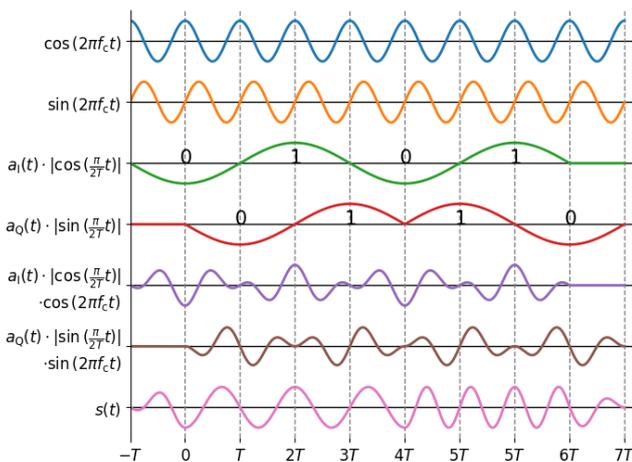


Fig. 4 Generation process of MSK signal by MCU (0,0,1,1,0,1,1,0).

試作した変調器の変調信号を式で示すと次式のようにになる。

$$s(t) = a_I(t) \left| \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \right| \cos(2\pi f_c t) - a_Q(t) \left| \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \right| \sin(2\pi f_c t) \quad (8)$$

また、サンプリングする対象のシンボルを変更したり、Q 軸の遅延の有無を切り替えたりすることで、QPSK や OQPSK、FSK など、他の変調方式へも転用が可能である。

### 4. 動作試験

サンプリング周波数を 40 kHz、搬送波周波数を 2.5 kHz、シンボルレートを 1250 baud、としてバイナリデータ [0,0,1,1,0,1,1,0] を変調した際の信号波形を Fig. 5 に示す。

MSK は、FSK と同様に搬送波周波数を中心周波数として、 $\pm \Delta f$  の周波数信号が生成される。 $\Delta f$  は式(2)より、変調指数  $h$  と 1 ビットあたりの変調にかかる時間  $T$  から求めることができる。MSK は、変調指数が 0.5、1 シンボル当たり 2 ビットのデータを変調できるため、シンボルレートを 1250 baud (80  $\mu$ s) とすると、1 ビットあたりの変調にかかる時間は 40  $\mu$ s である。よって、 $\Delta f$  は 0.625 kHz となり、変調によって生成される周波数は  $2.5 \pm 0.625$  kHz、つまり 3.125 kHz (320  $\mu$ s) と 1.875 kHz (533  $\mu$ s) となる。

信号波形から、周波数が最小時、最大時の半周期当たりの時間を読み取ると、270  $\mu$ s と 160  $\mu$ s になっていることが分かる。これは、533  $\mu$ s と 320  $\mu$ s のおよそ半分であることから、周波数偏移が正常に  $2.5 \pm 0.625$  kHz となっていることが確認できる。

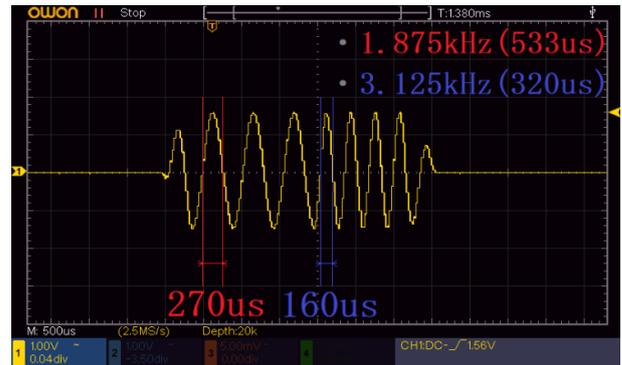


Fig. 5 Modulated signal by MCU (0,0,1,1,0,1,1,0).

### 5. まとめ

本研究では、MCU を用いた MSK 変調器の試作、および変調実験を行った。現時点では、ソフトウェア解析で同期検波を用いた復調を行っているが、処理が複雑であるため、MCU に実装することは難しい。しかし、MSK 復調には処理が比較的単純な遅延検波が利用可能であるため、今後は MCU を用いた MSK 復調器も試作し、MBC 通信実験に活用したいと考えている。

### 文献

- (1) 福田明, “流星バースト通信”, コロナ社 1997,
- (2) 斉藤洋一, “デジタル無線通信の変復調”, 社団法人電子情報通信学会 1996,
- (3) ペイトン Z.ピーブルズ,Jr., “デジタル通信システム”, HBJ 出版局 1989.